

Concurso de acceso a plazas de
cuerpos docentes universitarios
Universidad Politécnica de Madrid

Resolución de 30 de diciembre de 2010
(BOE de 18 de enero de 2011)

Plaza número 21
Profesores Titulares de Universidad
ETS Ingenieros de Telecomunicación
Dep. Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones

Proyecto Investigador

Luis Mendo Tomás

Marzo de 2011

Este Proyecto Investigador se presenta como parte de la documentación requerida para el Concurso de Acceso a plazas de cuerpos docentes universitarios convocado por Resolución de 30 de diciembre de 2010, de la Universidad Politécnica de Madrid (BOE de 18 de enero de 2011).

La plaza a la que se concursa es:

- Número de la plaza: 21.
 - Centro: E.T.S.I. de Telecomunicación.
 - Cuerpo: Profesores Titulares de Universidad.
 - Departamento: 0935. Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones.
 - Área de conocimiento: 800. Teoría de la señal y Comunicaciones.
 - Perfil docente: Radiocomunicaciones. Comunicaciones Móviles.
 - Perfil investigador: 3325. Tecnología de las Telecomunicaciones.
 - Dedicación: Completa
-

Índice general

Índice general	III
Índice de figuras	V
Índice de tablas	VII
Presentación del proyecto investigador	1
1. Contexto del proyecto investigador	3
1.1. Introducción. Ámbito del proyecto	3
1.2. La investigación y su entorno	4
1.2.1. La investigación en ingeniería	4
1.2.2. La investigación en la universidad española	4
1.2.3. La investigación en la Universidad Politécnica de Madrid	5
1.2.4. La investigación en el ámbito del proyecto propuesto	7
1.3. Fuentes de financiación en la investigación universitaria	8
1.3.1. Programas de la Unión Europea	8
1.3.2. Programas Nacionales	10
1.3.3. Programas de la Comunidad de Madrid	12
1.3.4. Ayudas a la investigación de la Universidad Politécnica de Madrid	13
1.3.5. Ayudas a la investigación en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Madrid	14
1.3.6. Contratos con empresas	14
1.4. Grupo de investigación	14
1.4.1. Descripción del grupo de investigación	14
1.4.2. Experiencia investigadora del grupo en relación con el proyecto propuesto	16

ÍNDICE GENERAL

2. Planificación del proyecto investigador	19
2.1. Situación de LTE, características y estado de la técnica	19
2.1.1. Estandarización y situación actual de LTE	19
2.1.2. Descripción general de la tecnología LTE	21
2.1.3. Estado de la técnica	30
2.2. Motivación y justificación del proyecto	36
2.3. Objetivos	38
2.4. Beneficios esperados	39
2.5. Plan de trabajo	40
2.5.1. Actividades y tareas	40
2.5.2. Organización temporal	43
2.6. Medios necesarios	44
2.6.1. Medios materiales	44
2.6.2. Personal	45
2.7. Presupuesto y financiación	46
2.7.1. Presupuesto	46
2.7.2. Financiación	47
2.8. Difusión de resultados	50
Referencias	53
Glosario de siglas	61

Índice de figuras

2.1. Organización temporal de las tareas del proyecto	44
---	----

Índice de tablas

2.1. Presupuesto real (sin incluir el coste de los equipos ya disponibles)	48
2.2. Presupuesto completo (incluyendo el coste de todos los equipos)	49

Presentación del proyecto investigador

Antecedentes

La Resolución de 30 de diciembre de 2010, de la Universidad Politécnica de Madrid (Boletín Oficial del Estado de 18 de enero de 2011), por la que se convoca concurso de acceso a plazas de cuerpos docentes universitarios [1], establece en su base 6.1 la necesidad de presentar, entre otros documentos:

Proyecto docente e investigador, para el desempeño de la plaza, que incluirá el programa docente, para la plaza del cuerpo docente convocada a concurso de acceso.

El Anexo I de la citada Resolución establece para la plaza número 21 el siguiente perfil investigador:

3325. Tecnología de las Telecomunicaciones.

Contenido del Proyecto Investigador

El candidato pertenece al GTIC-Radiocomunicaciones (Grupo de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, rama de Radiocomunicaciones), anteriormente GRC (Grupo de Radiocomunicación), al que se incorporó en 1996, y en el que viene desarrollando su actividad investigadora desde entonces. Actualmente ocupa una plaza de Profesor Titular de Universidad Interino dentro de dicho grupo.

El Proyecto Investigador se encuadra en el ámbito de la tecnología LTE (*Long-Term Evolution*) para redes móviles, que encaja perfectamente dentro del perfil investigador de la plaza por la que se concursa. Además de cumplir este requisito, los motivos para la elección del tema han sido, por un lado, su gran relevancia en relación con el futuro próximo de los sistemas de comunicaciones móviles; y, por

PRESENTACIÓN DEL PROYECTO INVESTIGADOR

otro, la experiencia del grupo de investigación, y en particular del candidato, en aspectos relacionados con la tecnología UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) y sus evoluciones HSDPA (*High-Speed Downlink Packet Access*), HSUPA (*High-Speed Uplink Packet Access*) y LTE.

El Proyecto Investigador se organiza en dos capítulos. En el primero se analiza el contexto del proyecto propuesto, y en el segundo se aborda la descripción y planificación del mismo. Se incluye al final (pág. 61) un glosario que recoge todas las siglas utilizadas.

Capítulo 1

Contexto del proyecto investigador

En este capítulo se analiza el contexto general del proyecto de investigación. En primer lugar (§1.1) se describe brevemente el ámbito del proyecto, para seguidamente comenzar el estudio del contexto con algunas consideraciones básicas sobre la investigación y su entorno (§1.2). Se examinan después (§1.3) las fuentes de financiación en la investigación universitaria, y por último (§1.4) se presenta el grupo de investigación en el que se desarrolla el proyecto.

1.1. Introducción. Ámbito del proyecto

Para analizar el contexto del proyecto de investigación, es necesario especificar en primer lugar el ámbito en el que se encuadra el trabajo propuesto (la descripción detallada del mismo se lleva a cabo en el capítulo §2).

El trabajo de investigación que se propone en este Proyecto Investigador se enmarca en la tecnología de comunicaciones móviles LTE, concebida como la evolución a largo plazo del estándar UMTS. La finalidad del proyecto es encontrar nuevas técnicas de adaptación de tasa binaria y planificación de usuarios dependiente del canal radio para LTE, que mejoren las prestaciones de las actualmente existentes. El estudio se centra en el enlace descendente, y contempla los diferentes modos de transmisión definidos en LTE, incluyendo multiplexación espacial mediante técnicas multiantena.

Una vez definido el ámbito del trabajo, se describe en los siguientes apartados el contexto en el que se desarrolla.

1.2. La investigación y su entorno

1.2.1. La investigación en ingeniería

La investigación se entiende como la realización de actividades intelectuales y experimentales de modo sistemático con el propósito de aumentar los conocimientos sobre una determinada materia [2]. Puede clasificarse en:

- Investigación básica, que es aquella que tiene como fin ampliar el conocimiento científico, sin perseguir, en principio, ninguna aplicación práctica;
- Investigación aplicada, orientada a la aplicación de los conocimientos, en la mayoría de los casos en provecho de la sociedad.

La investigación en ingeniería suele ser aplicada, por la propia naturaleza de la materia a la que se refiere, que se ocupa del estudio y aplicación de las diversas ramas de la tecnología [2]. Debido a este carácter aplicado, es fundamental la relación entre los centros de investigación y los centros de producción o industria. Sólo mediante una relación fluida entre ambos tipos de entidades puede asegurarse que la investigación vaya orientada a aportar beneficios a la sociedad, y que los resultados de la investigación puedan materializarse en tales beneficios. Corresponde principalmente a la Administración la articulación de políticas que permitan lograr esa deseada fluidez.

1.2.2. La investigación en la universidad española

La Ley Orgánica de Universidades (6/2001, modificada por la Ley Orgánica 4/2007) [3] [4] establece la investigación como una de las misiones de la Universidad. La investigación en la Universidad se regula principalmente en el título VII: “De la investigación en la Universidad”, que señala:

- La investigación científica es fundamento esencial de la docencia y una herramienta primordial para el desarrollo social a través de la transferencia de sus resultados a la sociedad. Como tal, constituye una función esencial de la Universidad.
- Se reconoce y garantiza la libertad de investigación en el ámbito universitario.
- La Universidad tiene, como uno de sus objetivos esenciales, el desarrollo de la investigación científica, técnica y artística y la transferencia del conocimiento a la sociedad, y atenderá tanto a la investigación básica como a la aplicada.

- La investigación es un derecho y un deber del personal docente e investigador de las Universidades.
- La investigación se llevará a cabo, principalmente, en Grupos de investigación, Departamentos e Institutos universitarios de investigación.
- El fomento de la investigación científica y el desarrollo tecnológico corresponderá en el ámbito universitario a la Administración General del Estado y a las Comunidades Autónomas, de acuerdo con la legislación aplicable, sin perjuicio del desarrollo de programas propios de las Universidades.
- Uno de los objetivos del referido fomento es la vinculación entre la investigación universitaria y el sistema productivo, como vía para articular la transferencia de los conocimientos generados y la presencia de la Universidad en el proceso de innovación del sistema productivo y de las empresas.

En su título XI: “Del régimen económico y financiero de las Universidades públicas”, la Ley Orgánica de Universidades establece, en cuanto a la vinculación entre la investigación universitaria y el sistema productivo, que los Grupos de investigación, los Departamentos y los Institutos universitarios de investigación, y su profesorado, podrán celebrar contratos con personas, universidades o entidades públicas y privadas para la realización de trabajos de carácter científico o técnico.

1.2.3. La investigación en la Universidad Politécnica de Madrid

Los Estatutos de la Universidad Politécnica de Madrid [5] recogen los principios establecidos en la Ley Orgánica de Universidades, desarrollando o ampliando algunos de ellos. En este sentido, el título preliminar: “Disposiciones generales” establece lo siguiente:

- La libertad de investigación se manifiesta en el ejercicio del derecho a la libre utilización de los principios metodológicos, la elección de los objetivos pertinentes y la difusión de los resultados obtenidos en la actividad investigadora.
- Es competencia de la Universidad Politécnica de Madrid la creación de estructuras específicas que actúen como soporte de la investigación.

El título III: “De la enseñanza y la investigación” dispone lo siguiente en relación con la investigación:

CAPÍTULO 1. CONTEXTO DEL PROYECTO INVESTIGADOR

- La Universidad Politécnica de Madrid promoverá la integración entre docencia e investigación, de manera que los resultados de la investigación que se desarrolle en su seno tengan un adecuado reflejo en la actividad docente.
- Teniendo en cuenta su tradición y especificidad, la Universidad Politécnica de Madrid impulsará en particular la transferencia de sus resultados de investigación a la sociedad. Dicha transferencia se hará en coordinación y complementariedad con los demás agentes del sistema de ciencia y tecnología.
- La investigación se estructurará alrededor de Grupos de investigación, Departamentos, Institutos Universitarios y Centros de I+D+i, sin perjuicio de la libre creación, organización y promoción por la Universidad Politécnica de Madrid de otras estructuras que determine para su desarrollo y de la libre investigación individual.
- La Universidad Politécnica de Madrid incluirá en sus presupuestos las dotaciones adecuadas para el fomento de su actividad investigadora, incluyendo planes propios de investigación, programas de becas y ayudas o cualquier otra iniciativa que potencie esta actividad, respetando los principios de competitividad y transparencia. La Universidad facilitará, asimismo, la participación de su profesorado y personal investigador en proyectos del Plan Nacional de I+D+i, del Plan Regional de Investigación Científica e Innovación Tecnológica, de los Programas Marco de la Unión Europea y otros análogos.
- La dotación económica de las Escuelas y Facultades, los Departamentos, los Institutos Universitarios de Investigación, los Centros de I+D+i y otras estructuras análogas, se determinará teniendo en cuenta los resultados de su actividad investigadora.
- La Universidad Politécnica de Madrid contribuirá a la máxima difusión de los planes, actividades y resultados de la investigación de sus miembros y promoverá acciones especiales de fomento de la investigación.
- Los recursos aportados por los convenios y contratos objeto de la presente sección se distribuirán en tres partes: una, para la remuneración de los profesores participantes en las actividades; otra, para cubrir los gastos de material y personal necesarios para la realización de éstas; y una tercera, a deducir del monto neto total contratado, en concepto de canon para sufragar los gastos de gestión y compensar el uso de medios propios de la Universidad. El canon se distribuirá en partes diferenciadas, destinadas a incrementar; por un lado, el crédito general de la Universidad para investigación y docencia;

por otro, la dotación de las Escuelas y Facultades, Institutos de Investigación y Centros de I+D+i afectados; y por un tercero, los fondos propios de los Departamentos participantes.

- La Universidad Politécnica de Madrid promoverá la creación y participación en empresas de base tecnológica a partir de la actividad investigadora, en cuyas actividades podrá participar su personal, de forma retribuida, por cualquiera de los cauces legalmente establecidos.

1.2.4. La investigación en el ámbito del proyecto propuesto

En el campo de las comunicaciones móviles pueden distinguirse varios tipos de agentes, con diferentes posturas y grados de implicación en tareas de investigación:

- Fabricantes de equipos: la investigación es parte esencial de su actividad, ya que les permite mejorar sus productos e incrementar su competitividad.
- Operadores de redes móviles: su compromiso con la investigación es menor, al ser empresas de servicios, cuya red está constituida por equipos adquiridos a uno o varios fabricantes.
- Empresas de consultoría: se dedican, entre otras tareas, a la planificación radio y optimización de la red del operador que las contrata. En muchos casos, la investigación es una parte importante de la actividad de la empresa.
- Universidades: llevan a cabo tareas de investigación, al ser ésta una de sus misiones fundamentales.

Pueden identificarse dos tipos de investigación en este campo:

- Investigación relativa a los equipos: consiste en la mejora de éstos para la introducción de prestaciones superiores o nuevas características.
- Investigación relativa a la red: se trata de estudios orientados a la optimización en el uso de los recursos de la red, con objeto de mejorar su funcionamiento. No afecta a los equipos, sino a la utilización y configuración de los mismos en un sistema completo.

La investigación relativa a los equipos es realizada por sus fabricantes, en ocasiones con la colaboración con otras empresas o instituciones. La investigación relativa a la red interesa directamente al operador, y por tanto es él a quien en principio le corresponde. No obstante, es habitual que el fabricante se encargue de las labores de mejora y ajuste de la red del operador. De hecho, cada vez es más

frecuente que el operador encargue todo el despliegue y planificación de la red al fabricante, en forma de proyecto cerrado. En el ámbito de la investigación sobre la red tienen cabida también las empresas de consultoría, que ofrecen servicios orientados a la mejora de las redes. Por último, las universidades participan en los dos tipos de investigación, muchas veces en colaboración con alguno de los otros agentes.

La investigación relativa a los equipos lleva a la definición de nuevos sistemas, cuando se dispone (o se prevé disponer) de un conjunto de mejoras que exceden las posibilidades de los sistemas existentes. La tendencia actual en la definición de los sistemas, impulsada por el gran éxito del GSM (*Global System for Mobile Communications*¹), es basarse en normas estandarizadas internacionalmente, para permitir la interoperabilidad de equipos y lograr ventajas derivadas de economías de escala. Así, la especificación del sistema se lleva a cabo en el seno de organismos internacionales de estandarización, en los que tienen representación los agentes interesados de cada una de las categorías señaladas anteriormente. La contrapartida a las ventajas mencionadas es una mayor lentitud en el proceso de definición del sistema, y la necesidad en muchas ocasiones de llegar a soluciones de compromiso entre intereses contrapuestos.

En el caso de UMTS y su evolución, la estandarización se canaliza a través del 3GPP (*Third Generation Partnership Project*), que es una asociación de organismos de estandarización entre los que se encuentra el ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*). En el 3GPP participan todas las empresas afiliadas a alguno de los organismos de estandarización integrantes, y las decisiones tomadas son aplicadas en los países de influencia de cada organismo de estandarización.

1.3. Fuentes de financiación en la investigación universitaria

1.3.1. Programas de la Unión Europea

Séptimo Programa Marco El VII Programa Marco de Investigación y Desarrollo Tecnológico es el principal instrumento de la Unión Europea para financiar la investigación en Europa. Su duración prevista es de 2007 a 2013. Además, está diseñado para responder a las necesidades de empleo de Europa y reforzar su competitividad. El programa apoya la investigación en ciertas áreas de prioridad. El propósito es mejorar o consolidar la posición de la Unión Europea en esos sectores.

¹Originalmente el significado de las siglas era *Groupe Spécial Mobile*.

1.3. FUENTES DE FINANCIACIÓN EN LA INVESTIGACIÓN UNIVERSITARIA

El VII Programa Marco se compone de cuatro bloques principales de actividades que conforman cuatro programas, más un quinto programa específico sobre la investigación nuclear [6]:

- “Cooperación”: apoya proyectos de cooperación internacional en la Unión Europea y fuera de sus fronteras. Este programa pretende fomentar el avance del conocimiento y la tecnología en diez áreas temáticas correspondientes a otros tantos campos de la ciencia y la investigación.
- “Ideas”: abarca todas las actividades que pondrá en práctica el Consejo Europeo de Investigación. Se espera que dicho Consejo goce de un alto grado de autonomía para desarrollar investigación de alto nivel, de forma que consolide la excelencia en Europa.
- “Personas”: ofrece a los ciudadanos la oportunidad de desarrollar una carrera en investigación. Fomenta que los investigadores europeos permanezcan en Europa y, al mismo tiempo, que los mejores investigadores de todo el mundo se sientan atraídos por la excelencia y las infraestructuras de la investigación europea.
- “Capacidades”: el propósito del programa es optimizar el uso de las infraestructuras de investigación y el desarrollo de las mismas y, simultáneamente, aumentar la capacidad innovadora de las empresas para beneficiarse de la investigación.
- “Investigación nuclear y formación”: programa de investigación y formación en materia nuclear.

Dentro del primer programa existe un apartado específico sobre Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. Este apartado tiene un presupuesto de 9100 millones de euros.

Acciones COST El programa COST (*European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research*), iniciado en 1971, es uno de los principales marcos de cooperación europeos en tareas investigadoras. En él participan todos los países miembros de la Unión Europea, junto con otros países no miembros, así como instituciones de países no miembros y organizaciones internacionales.

La actividad del programa COST se articula mediante “acciones”, que son redes organizadas en torno a proyectos de investigación en campos que son de interés para al menos cinco países. Estas acciones se agrupan en nueve dominios, en función del tema que tratan. Uno de estos dominios se centra en las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones.

Las acciones COST constituyen un instrumento de coordinación entre investigadores de distintos países que ya cuentan con financiación nacional para sus proyectos de investigación. COST solamente financia los gastos de dicha coordinación, como reuniones de grupos de trabajo, estancias de corta duración o actividades de difusión. El presupuesto del programa COST proviene fundamentalmente del Programa Marco.

Este mecanismo ha demostrado su eficacia en el establecimiento de relaciones duraderas entre equipos de investigación en el ámbito internacional.

1.3.2. Programas Nacionales

Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica El Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica (I+D+i) 2008–2011 tiene como principios básicos poner las actividades de investigación, desarrollo e innovación al servicio de la ciudadanía, del bienestar social y de un desarrollo sostenible, con plena e igual incorporación de la mujer; constituirse en un factor de mejora de la competitividad empresarial; y ser un elemento esencial para la generación de nuevos conocimientos.

El Plan Nacional de I+D+i se estructura en tres tipos de elementos:

- Áreas: directamente relacionadas con los objetivos generales y ligadas a programas instrumentales que tienen objetivos concretos.
- Líneas instrumentales de actuación: agrupan un conjunto de instrumentos relacionadas con las áreas.
- Programas Nacionales: representan las grandes actuaciones del Plan Nacional de I+D+i. Se ponen en marcha a través de convocatorias públicas. Los programas nacionales están directamente relacionados con las líneas instrumentales de actuación y responden a los objetivos trazados en cada una de las áreas del Plan Nacional.

Dentro de los instrumentos de financiación existentes, pueden destacarse los siguientes:

- Programa de CENIT (Consortios Estratégicos Nacionales en Investigación Técnica);
- Programa Consolider;
- Plan Avanza;
- Plan Euroingenio.

1.3. FUENTES DE FINANCIACIÓN EN LA INVESTIGACIÓN UNIVERSITARIA

En todos los casos, los procedimientos de gestión, evaluación y seguimiento de la gestión del Plan Nacional I+D+i corresponden a las unidades competentes de la Administración. Recientemente se han acometido reformas legislativas (reglamento de la Ley General de Subvenciones, aprobado por el Real Decreto 887/2006 [7]; Ley 28/2006, de Agencias estatales para la mejora de los servicios públicos [8]) para mejorar la gestión de las políticas de I+D+i, reducir las trabas burocráticas y fomentar la transferencia de tecnología y la cooperación entre los Centros Públicos de Investigación y las empresas.

CENIT El programa CENIT está destinado a la investigación industrial (dotación de 1.000 millones de euros a lo largo de cuatro años; cofinanciado al 50 % por el sector privado).

Este programa busca estimular la colaboración en I+D+i entre las empresas, las universidades, los organismos y centros públicos de investigación, los parques científicos y tecnológicos y los centros tecnológicos. Financia grandes líneas de investigación industrial. También cuenta con fondos de capital-riesgo (Neotec) para crear y consolidar empresas tecnológicas. Los proyectos CENIT cofinancian grandes actuaciones de investigación público-privada, tienen una duración mínima de 4 años y un presupuesto de al menos 5 millones de euros anuales, con una financiación mínima del 50 % por parte del sector privado.

Consolider La finalidad del programa Consolider es fomentar la excelencia científica y académica mediante la cooperación entre investigadores en torno a consorcios e instalaciones singulares (financiación de 2.000 millones de euros durante cuatro años).

Los proyectos Consolider ofrecen financiación de larga duración (5–6 años) y de gran volumen (1–2 millones de euros) para grupos y redes de investigación excelentes en cualquiera de las áreas de conocimiento del Programa Nacional de I+D+i. Los objetivos de esta iniciativa son aumentar el tamaño medio de los grupos de investigación, incrementar la dotación financiera de las mejores líneas de investigación, corregir el excesivo fraccionamiento de las investigaciones e impulsar la participación de los centros públicos de investigación en el Programa Marco europeo.

Avanza Con el plan Avanza se pretende alcanzar la media europea de inversión en Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (financiación incremental de 5.700 millones de euros).

El plan Avanza agrupa todas las políticas de I+D+i en el ámbito de la Sociedad de la Información. Concede ayudas para la realización de proyectos de

investigación industrial y desarrollo experimental de ámbito nacional, de cooperación público-privada y de cooperación internacional, entre otros. Se centra en las siguientes líneas de actuación: hogar y ciudadano; empresas; e-administración; educación; y contexto digital.

El plan se estructura en tres grandes líneas horizontales que pretenden incorporar a la Sociedad de la Información a ciudadanos, empresas y Administraciones Públicas. Además, existe una serie de actuaciones sectoriales. Todas las Comunidades y Ciudades Autónomas se han unido al plan Avanza a través de convenios; y tanto las Comunidades Autónomas como las empresas han participado en su diseño.

Euroingenio Euroingenio es un plan genérico que engloba cuatro programas de impulso a la I+D+i española, cuyo objetivo común es conseguir que en los años de vigencia del VII Programa Marco de la Unión Europea los recursos obtenidos por nuestro país a través de este programa lleguen al 8 %, mejorando el retorno obtenido por España en el anterior Programa Marco, que fue del 5,9 %. De esta forma, los retornos que llegan por el VII Programa Marco se igualarían al peso económico español en la Unión Europea.

Los cuatro programas específicos contemplados son: Eurociencia para los investigadores; Innoeuropa para los centros tecnológicos; Eurosalud para proyectos de investigación sanitaria; y Tecnoeuropa para aglutinar al sector empresarial, asociaciones y plataformas tecnológicas.

1.3.3. Programas de la Comunidad de Madrid

Plan Regional de Investigación Científica e Innovación Tecnológica de la Comunidad de Madrid En la Comunidad de Madrid está previsto el desarrollo del V PRICIT (Plan Regional de Investigación Científica e Innovación Tecnológica). El anterior plan (el IV) estuvo vigente en el periodo 2005–2008. Estos planes responden al objetivo del gobierno regional de promover la investigación, la ciencia y la tecnología al servicio de los ciudadanos.

Es de esperar que el V Plan tenga una estructura similar a la del IV, el cual incluía siete áreas de actuación [9], con los objetivos que se indican para cada una:

- Creación de capital humano: establecer una carrera pública de investigador.
- Grupos de investigación: mejorar la competitividad de los investigadores de la Comunidad de Madrid y su relación con las demandas sociales y productivas.

1.3. FUENTES DE FINANCIACIÓN EN LA INVESTIGACIÓN UNIVERSITARIA

- Coordinación y dotación de infraestructuras de interés regional: convertir a Madrid en un centro de servicios de alto valor en I+D+i y diseñar un mapa de recursos e infraestructuras.
- Fomento de la cooperación y de la I+D+i empresarial: buscar la provisión de servicios de apoyo a la comercialización de los resultados de investigación desde plataformas de carácter regional; apoyar a las empresas que deseen poner en marcha proyectos de I+D+i.
- Cooperación interregional: desarrollar un marco de cooperación interregional, en especial con Castilla-La Mancha y con Castilla y León.
- La ciencia en la sociedad: fomentar iniciativas dirigidas a promover los valores de la cultura científico-tecnológica.
- Gestión, seguimiento y evaluación: incluir el concepto de evaluación como una de las líneas de actividad prioritarias del plan regional.

Debe señalarse, por otro lado, la participación de la Comunidad de Madrid como cofinanciadora en algunas de las ayudas convocadas por la Universidad de Madrid, que se describirán a continuación.

1.3.4. Ayudas a la investigación de la Universidad Politécnica de Madrid

La Universidad Politécnica de Madrid ofrece ayudas por medio de los siguientes programas:

- Proyectos y actividades de I+D+i: ofrece, entre otras, las siguientes ayudas:
 - Ayudas, cofinanciadas por la Comunidad de Madrid, para apoyar las líneas de I+D en el Programa de creación y consolidación de los grupos de investigación de la Universidad Politécnica de Madrid.
 - Ayudas, cofinanciadas con Fondo Social Europeo, a programas de actividades de I+D entre grupos de investigación de la Comunidad de Madrid.
- Becas y contratos:
 - Becas de investigación: ayudas para becas y contratos para la realización del doctorado.
 - Becas de investigación homologadas: ayudas para becas y contratos homologados para la realización del doctorado financiadas por los grupos de investigación en el marco de proyectos de I+D.

- Ayudas para becas y contratos para la realización del doctorado, en el marco del Campus de Excelencia Internacional de Moncloa.
 - Programa UPM I3: contratación de doctores con perfil investigador.
 - Ayudas para la contratación de jóvenes doctores, en el marco del Campus de Excelencia Internacional de Moncloa.
 - Contratos Marie Curie, cofinanciados por la Unión Europea (VII Programa Marco).
- Las convocatorias de ayudas para la difusión y explotación de resultados que tradicionalmente venía manteniendo la Universidad Politécnica de Madrid (presentación de ponencias y comunicaciones en congresos, financiación de congresos organizados por la Universidad Politécnica de Madrid, publicación de artículos en revistas especializadas) se encuentran actualmente cerradas. Es de esperar que en el futuro, en función de la financiación disponible, se vuelvan a abrir.

1.3.5. Ayudas a la investigación en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Madrid

La Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación, además de colaborar en la gestión de las ayudas económicas de la Universidad Politécnica de Madrid, viene ofreciendo ayudas para la publicación de artículos en revistas recogidas en el índice *Journal Citation Reports*, con cuantías similares a las que concedía la Universidad Politécnica de Madrid.

1.3.6. Contratos con empresas

La Ley Orgánica de Universidades (6/2001, 4/2007) [3] [4] fija las pautas por las que se rige la contratación de trabajos de investigación con empresas (véase §1.2.2). Además de ser una fuente de financiación para la actividad investigadora de la Universidad, la relación con la empresa facilita una transferencia de resultados hacia ésta, y sirve de estímulo para ambas partes.

1.4. Grupo de investigación

1.4.1. Descripción del grupo de investigación

El grupo de investigación al que pertenece el candidato, y en el que se enmarca la investigación propuesta en este Proyecto Investigador, es el Grupo de Tecnolo-

gías de la Información y las Comunicaciones (GTIC) de la Universidad Politécnica de Madrid. El grupo tiene su sede en el Departamento de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones, adscrito a la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación, y está formado por profesores e investigadores de dicho centro y de la Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica de Telecomunicación.

El GTIC se creó en 1994 en el Departamento de Señales, Sistemas y Radiocomunicaciones, con la misión de contribuir a la investigación, conocimiento y difusión de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, así como de su impacto social, económico y político.

En 1992 se creó el Grupo de Radiocomunicación (GRC) del mismo Departamento, cuyas líneas de investigación se han desarrollado en diferentes campos relacionados con las radiocomunicaciones fijas, móviles o de difusión, con especial énfasis en las comunicaciones móviles y la propagación de ondas radioeléctricas.

Desde 2008, el actual GTIC integra a ambos grupos, cuyos miembros mantienen además relaciones de colaboración con otras instituciones españolas e internacionales: administración, empresas, universidades y centros de investigación. Las denominaciones “GTIC-Regulación y Mercado” y “GTIC-Radiocomunicaciones” permiten identificar de forma más concreta sus ámbitos de trabajo.

En el campo de las comunicaciones móviles, las líneas de investigación que mantiene actualmente el grupo son las siguientes:

- Algoritmos de adaptación de tasa binaria y planificación de usuarios en LTE.
- Métodos de coordinación de interferencias en LTE.
- Algoritmos de control de potencia y adaptación de enlace en redes UMTS, HSDPA y HSUPA.
- Desarrollo de modelos de simulación en el nivel de sistema orientados a la planificación radio de UMTS y LTE.
- Optimización de modelos de cálculo de la atenuación de propagación.

Desde 2008, el grupo ha publicado 11 artículos en revistas internacionales y 25 ponencias en congresos internacionales. A lo largo de la historia del grupo primero como GRC y luego como GTIC, sus miembros han publicado un total de 9 libros en el ámbito de las comunicaciones móviles y las radiocomunicaciones, algunos de los cuales son ampliamente utilizados como libros de texto en numerosas universidades.

1.4.2. Experiencia investigadora del grupo en relación con el proyecto propuesto

En los últimos años, el GTIC-Radiocomunicaciones ha llevado a cabo una labor de investigación continuada en el campo de los sistemas de comunicaciones móviles de Tercera Generación y su evolución (UMTS, HSDPA, HSUPA y LTE). Dicha investigación está avalada por las siguientes publicaciones:

- Tesis doctoral del candidato [10], sobre capacidad de sistemas celulares WCDMA (*Wideband Code-Division Multiple Access*).²
- Artículos en revistas internacionales sobre control de potencia y asignación óptima de usuarios a estaciones base [11] [12]. Se han publicado también varios artículos sobre métodos de simulación de Monte Carlo [13] [14] [15] [16]. La motivación inicial para el análisis de estos métodos fue la necesidad de recurrir a la simulación como parte esencial en el estudio de sistemas de comunicaciones móviles, y de hecho los métodos se han aplicado en dicho estudio.
- Artículos en congresos internacionales, sobre capacidad de tráfico de sistemas de Tercera Generación basados en WCDMA [17], asignación subóptima de usuarios a estaciones base [18], control de potencia [19] y métodos de simulación [20].
- Patentes concedidas en el campo del control de potencia y adaptación al enlace radio en sistemas de comunicaciones móviles [21] [22] [23] [24] [25].

De todas las publicaciones indicadas es (co)autor/inventor el candidato.

Asimismo, el grupo ha participado en diferentes proyectos de investigación en este campo, en los cuales ha estado involucrado de forma muy activa el candidato. Se indican a continuación los más relevantes, describiendo brevemente los resultados obtenidos:

- “Control de potencia en comunicaciones móviles de Tercera Generación”. Contrato con Top Optimized Technologies, S.L. Octubre 2004–Julio 2007. Investigador responsable: José María Hernando Rábanos.

El proyecto ha consistido en un estudio de nuevos algoritmos de control de potencia en bucle externo para UMTS. Se ha llegado a la definición de varios algoritmos que permiten obtener mejoras importantes en la capacidad

²Esta tesis ha recibido el Premio Nokia a la mejor tesis doctoral en Internet Móvil y Soluciones Móviles de Tercera Generación en la XXIII Convocatoria de Premios del Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación.

de las redes UMTS. El estudio ha dado lugar a varias patentes (ya mencionadas) [21] [22] [23] [24] [25] y a contribuciones en el grupo de trabajo RAN WG4 (*Radio Access Network Working Group 4*): *Radio Performance and Protocol Aspects* del organismo de estandarización 3GPP [26] [27] [28] [29]. Los resultados se han mostrado a diversos fabricantes y operadores, algunos de los cuales han manifestado interés. Se han hecho pruebas en equipos de red reales, y actualmente algunos de estos algoritmos están en fase de integración en equipos de red de un conocido fabricante.

- “Viabilidad de la aplicación de técnicas novedosas de control de potencia para optimizar el ancho de banda de las comunicaciones móviles basadas en el estándar HSDPA (High Speed Downlink Packet Access)”. Proyecto financiado por el programa PROFIT (Programa de Fomento de la Investigación Tecnológica). 2005–2006. Investigador responsable: José María Hernando Rábanos.

En este proyecto se ha llevado a cabo un estudio de viabilidad para la mejora de la velocidad de transmisión en HSDPA, basada en la experiencia obtenida y en los algoritmos diseñados en el proyecto indicado anteriormente. Los resultados indican que dichos algoritmos no son directamente aplicables, pero sugieren posibles vías para mejorar las prestaciones de HSDPA.

- “Investigación de canales HSxPA para servicios en tiempo real como Voz sobre IP”. Proyecto financiado por el programa PROFIT. 2007. Investigador responsable: José María Hernando Rábanos.

Este estudio se centra en el estudio de planificadores de usuarios (*schedulers*) y en la evaluación de capacidad en HSDPA para aplicaciones de tiempo real, esto es, con requisitos estrictos de retardo. Este uso de HSDPA se aleja de la concepción inicial de esta tecnología, que en principio es adecuada para servicios sin garantías de tasa binaria ni de retardo, y requiere por tanto la utilización de técnicas específicas. Este proyecto ha proporcionado al grupo de investigación experiencia en el diseño de un simulador de enlace para HSDPA y en el análisis de planificadores de usuarios dependientes del canal radio que contemplan además criterios de retardo.

- “Convivencia de Canales UMTS con HSDPA”. Contrato con Top Optimized Technologies, S.L. Septiembre 2008–Diciembre 2008. Investigador responsable: José María Hernando Rábanos.

Este proyecto estudia la interacción de canales dedicados UMTS y HSDPA con portadora compartida. El trabajo ha ampliado la experiencia del grupo en el desarrollo de simuladores dinámicos de sistema.

- “Control de potencia y adaptación al enlace radio en redes de comunicaciones móviles de Tercera y de Cuarta Generación”. Contrato con Top Optimized Technologies, S.L. Febrero 2008–Diciembre 2009. Investigador responsable: Luis Mendo Tomás.

Este trabajo estudia, por medio de simulación, algoritmos de adaptación al enlace para HSDPA y HSUPA.

- “Proyecto R-Radio”. Contrato con Top Optimized Technologies, S.L. Octubre 2009–Septiembre 2010. Investigador responsable: José María Hernando Rábanos.

Dentro de este proyecto se ha iniciado el estudio de métodos de planificación en LTE. Se ha mejorado un simulador existente, de uso libre, y se han probado algoritmos básicos de planificación de usuarios, sin considerar multiplexación espacial. Se han dejado preparados algunos aspectos del programa para poder modelar algoritmos de planificación con multiplexación espacial.

En relación con los trabajos realizados en estos proyectos, el candidato ha sido o es tutor de los siguientes proyectos fin de carrera:

- “Análisis de la Adaptación al Enlace Radio en HSDPA en Canales No Estacionarios”. Carlos Tomás Rodríguez Lozano. Presentado en 2006. Calificación: 10.
- “Desarrollo de Algoritmos de Gestión de Recursos Radio en HSDPA para Servicios en Tiempo Real”. Sandra Abelleira González. Presentado en 2008. Calificación: 10.
- “Análisis de Servicios en Tiempo Real sobre HSDPA”. David Rueda Gómez. Presentado en 2008. Calificación: 10.
- “Adaptación el Enlace Radio en el Sistema HSDPA mediante Técnicas de Predicción de Canal”. Alejandro Mosquera Lezcano. Presentado en 2009. Calificación: 10.
- “Simulation and Analysis of Real-Time Services over HSDPA with Multi-code Transmission”. Javier Montoto Piñero. Presentado en 2009. Calificación: 10.
- “Técnicas de Adaptación al Enlace Radio en LTE”. Narciso García Cano. En fase de redacción.

Con esta experiencia, el GTIC-Radiocomunicaciones, y en particular el candidato, se encuentra en una situación idónea para acometer el proyecto que se propone.

Capítulo 2

Planificación del proyecto investigador

En este capítulo se presenta la planificación del proyecto de investigación. En primer lugar se describen (§2.1) la situación actual y las características básicas de la tecnología LTE, así como el estado de la técnica en el tema de investigación propuesto. Usando como base esta información, se motiva y justifica el tema de investigación elegido (§2.2). A continuación se desarrolla la programación, por medio de los siguientes apartados: objetivos (§2.3); beneficios esperados (§2.4); plan de trabajo (§2.5); medios necesarios (§2.6); presupuesto y financiación (§2.7); y difusión de resultados (§2.8).

2.1. Situación actual de LTE, características básicas y estado de la técnica

Como se ha indicado en §1.1, el proyecto de investigación se centra en la adaptación de tasa binaria y la planificación de usuarios para LTE. Para poder justificar la importancia e interés de este tema, es necesario describir en primer lugar el estado actual de estandarización y despliegue de LTE, así como las características básicas de funcionamiento de esta tecnología. De ello se ocupa este apartado, en el que además se revisa el estado de la técnica en este campo.

2.1.1. Estandarización y situación actual de LTE

Las comunicaciones móviles tienen en la actualidad una gran relevancia social y económica. Las nuevas redes permiten ofrecer gran variedad de servicios que no

eran posibles con las tecnologías anteriores. Dado que el uso de las redes y la demanda de capacidad de transmisión son cada vez mayores, el principal problema al que se enfrentan las comunicaciones móviles es la limitación en la tasa binaria que pueden ofrecer.

La Tercera Generación de sistemas de comunicaciones móviles surgió para dar respuesta a las crecientes necesidades de capacidad y velocidad de transmisión de las redes [30, cap. 12]. Dicha generación está representada en Europa por el sistema UMTS, cuya estandarización es llevada a cabo por el consorcio internacional 3GPP, que agrupa a varios organismos de estandarización de diferentes partes del mundo, incluyendo el ETSI. El 3GPP se creó en 1998 con el objetivo de coordinar la estandarización del sistema UMTS y sus diferentes evoluciones. Posteriormente se incluyeron también bajo el ámbito del 3GPP el mantenimiento y desarrollo de las especificaciones del sistema GSM y sus evoluciones, anteriormente responsabilidad del ETSI.

La especificación del sistema UMTS, igual que la de GSM, se desarrolla de forma escalonada, siguiendo un conjunto de fases [31]. La tecnología de acceso radio terrestre UMTS, conocida como UTRA (*UMTS Terrestrial Radio Access*), ha dado origen, mediante este proceso, a HSDPA y HSUPA, entre otros desarrollos. Uno de los más recientes avances, correspondiente a la *release* 8 del estándar, es la introducción de la tecnología LTE, también conocida como E-UTRA (*Evolved UMTS Terrestrial Radio Access*) [32, cap. 13]. Aunque formalmente se considera una evolución de UTRA, LTE es de hecho una tecnología de acceso radio completamente nueva, ya que, a diferencia de HSDPA y HSUPA, se ha diseñado sin restricciones de compatibilidad con sistemas anteriores. Asociada a la interfaz radio LTE, se ha definido una nueva arquitectura de red fija (*core network*) conocida como SAE (*Service Architecture Evolution*), o EPC (*Evolved Packet Core*). LTE/SAE tiene unas características operativas muy próximas a lo que la UIT define como sistemas de Cuarta Generación [33, apart. 1.1].

La generación de especificaciones por el 3GPP sigue el criterio general de estandarizar sólo lo imprescindible, esto es, lo necesario para permitir que puedan funcionar conjuntamente equipos de diferentes fabricantes. De acuerdo con esto, se definen entidades funcionales e interfaces que las conectan, y la especificación afecta principalmente a las interfaces, regulando el *intercambio de información* entre entidades funcionales [32, apart. 1.2].

El estándar, de acuerdo con lo anterior, deja bastante libertad en cuanto a los equipos concretos en los que se materializan las entidades funcionales, así como los algoritmos o procesos internos de cada equipo, siempre que se cumplan las normas señaladas en relación con las interfaces. Dicha libertad está limitada en algunos casos por requisitos de *prestaciones mínimas*, que se imponen para asegurar un funcionamiento aceptable de la red. Es destacable que estos requisitos se

2.1. SITUACIÓN DE LTE, CARACTERÍSTICAS Y ESTADO DE LA TÉCNICA

refieren en mayor medida a los terminales móviles¹ (por contraposición a los equipos de red). Gracias a esta libertad, cada fabricante de equipos tiene la posibilidad de mejorar sus algoritmos para lograr mejores prestaciones.

El sistema LTE está teniendo gran aceptación a nivel mundial. Su despliegue comercial está comenzando ya en algunos países europeos y en Estados Unidos. El organismo de estandarización 3GPP², impulsor de las tecnologías CDMAOne (IS-95) y CDMA2000, que compiten con UMTS y con sus tecnologías derivadas, abandonó en 2008 el desarrollo del estándar UMB (*Ultra Mobile Broadband*) [34, apart. 1.1]. Dicho estándar ofrecía características similares a las de LTE, pero la mayoría de los operadores decidieron adoptar LTE o WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*). De estas dos últimas, en la actualidad la opción de LTE parece despertar mayor interés, si bien WiMAX puede ser una alternativa en ciertos entornos.

En España ya han sido desplegadas algunas redes piloto de LTE, de extensión geográfica reducida, para la realización de pruebas de funcionamiento y medidas.

2.1.2. Descripción general de la tecnología LTE

Como aspectos generales de la interfaz radio LTE pueden destacarse los siguientes [32, cap. 14 y 15] [33, apart. 1.2] [34, apart. 1.2.3]:

- Transmisión y acceso múltiple multiportadora por medio de OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*) y su variante SC-FDMA (*Single-Carrier Frequency-Division Multiple Access*). Estas técnicas de transmisión posibilitan la adaptación a diferentes anchos de banda. Además permiten tratar de forma adecuada, y con una complejidad reducida, las variaciones del canal en tiempo y en frecuencia producidas por la propagación multi-trayecto. En LTE se utiliza una separación entre subportadoras de 15 kHz, y dos posibles duraciones del prefijo cíclico, cada una de las cuales está adaptada a diferentes condiciones de propagación y transmisión.
- Flexibilidad en cuanto a bandas de frecuencias y anchos de banda empleados. LTE puede utilizarse en un amplio margen de frecuencias, desde 450 MHz hasta al menos 3,5 GHz, con anchos de banda comprendidos entre 1,4 y 20 MHz. Puede operar además en modos FDD (*Frequency-Division Duplex*) o TDD *Time-Division Duplex*.
- Transmisión en la interfaz radio mediante paquetes, utilizando canales compartidos por todos los usuarios. La estación base² incluye una funcionalidad

¹El terminal móvil de UMTS y de LTE se denomina *user equipment* (UE) en las especificaciones del 3GPP.

²La estación base de LTE recibe el nombre de *e-node B* en las especificaciones del 3GPP.

denominada planificador de usuarios (*scheduler*), que se encarga de asignar dinámicamente los recursos a los diferentes usuarios. La asignación puede hacerse teniendo en cuenta el estado del canal radio de los usuarios, adaptándose en cierta medida a sus variaciones en tiempo y en frecuencia. Las posibles restricciones de retardo o de tasa binaria (por ejemplo, para servicios conversacionales o de *streaming*) deben tenerse en cuenta en la planificación de las transmisiones.

- Tasas binarias de pico de 100 y 50 Mb/s, para un ancho de banda de 20 MHz, en los enlaces descendente y ascendente respectivamente. Para lograr estas eficiencias espectrales se utilizan métodos avanzados como adaptación de tasa y planificación de usuarios dependiente del estado del canal radio; retransmisión con combinación; y técnicas multiantena.
- Arquitectura simplificada de la interfaz radio, en la cual únicamente existen los terminales móviles y las estaciones base, las cuales llevan a cabo todas las funciones de gestión de dicha interfaz.

A continuación se describen con más detalle las características de LTE de interés para el ámbito del proyecto.

Técnicas multiantena (MIMO) Las técnicas multiantena o MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) consisten, en general, en utilizar varias antenas en el transmisor o/y en el receptor para mejorar alguna de las características de la comunicación. Las técnicas MIMO pueden utilizarse para conseguir:

- *Diversidad*: al transmitir/recibir la señal desde/en diferentes antenas se puede conseguir una mayor resistencia a los desvanecimientos multitrayecto. Ello requiere que las antenas estén suficientemente separadas, de modo que los desvanecimientos experimentados en cada una sean aproximadamente independientes. Si esta condición no se cumple, puede conseguirse una ganancia de potencia que incrementa la relación señal a interferencia más ruido (*Signal to Interference plus Noise Ratio*, SINR), utilizando *conformación de haz* (*beamforming*); pero no se obtiene ganancia por diversidad.
- *Multiplexación espacial*³: pueden transmitirse simultáneamente varias señales o “flujos” (*streams*)⁴ independientes, que se detectan por separado en

³En ocasiones se utiliza la denominación “MIMO” para referirse únicamente a la multiplexación espacial. En este documento se sigue el criterio más general de denominar MIMO a cualquier técnica que utilice varias antenas en transmisión o/y en recepción.

⁴Las señales multiplexadas espacialmente, denominadas usualmente flujos o *streams*, reciben el nombre de “*layers*” en las especificaciones del 3GPP.

2.1. SITUACIÓN DE LTE, CARACTERÍSTICAS Y ESTADO DE LA TÉCNICA

el receptor. Con ello se consigue una mayor tasa binaria, consecuencia de la multiplexación de dichos flujos. Ello requiere el uso de varias antenas tanto en transmisión como en recepción, con separación suficiente, y además el canal multitrayecto debe tener suficiente dispersión angular para permitir la multiplexación.

En función de las características del canal de propagación será más conveniente una u otra de las dos modalidades indicadas. En esencia, si la SINR es suficientemente alta, se consiguen mayores incrementos de capacidad de transmisión mediante multiplexación espacial, mientras que para SINR bajas es más conveniente utilizar diversidad. Además el uso de multiplexación espacial requiere, como se ha indicado antes, disponer de varias antenas en ambos extremos, y el canal de propagación debe tener suficiente dispersión angular [32, cap. 6] [35, cap. 7].

El uso de cualquiera de estas técnicas requiere, en general, aplicar un procesado en el transmisor y en el receptor. El procesado aplicado en el transmisor se conoce como *pre-codificación espacial*, y suele ser lineal, de modo que queda definido mediante una matriz o vector de pre-codificación. También es posible combinar la pre-codificación espacial con codificación convencional en el tiempo, o en frecuencia en el caso sistemas OFDM, con lo cual resultan códigos en espacio-tiempo o en espacio-frecuencia. El procesado utilizado en el receptor, o *post-procesado espacial*, suele ser más complejo, y depende del tipo de técnica multiantena utilizada y de la pre-codificación aplicada en el transmisor.

En general, las técnicas MIMO se pueden utilizar de dos formas, en función de la existencia o no de realimentación sobre el estado del canal:

- En bucle abierto: el transmisor envía la señal sin usar ninguna realimentación por parte del receptor. Ejemplos de esta modalidad son el método de Alamouti para diversidad de transmisión [35, apart. 3.3.2] [36] y el método V-BLAST (*Vertical Bell Laboratories Layered Space-Time*) para multiplexación espacial [35, apart. 3.3.2].
- En bucle cerrado: la pre-codificación aplicada en el transmisor se elige en función del estado instantáneo del conjunto de canales de propagación definidos entre las diferentes antenas transmisoras y receptoras. Dicho estado es estimado en el receptor y realimentado al transmisor. La estimación del canal se realiza por medio de *señales de referencia* enviadas por la estación base en cada una de las antenas transmisoras. La realimentación consiste usualmente en un índice a un elemento de un conjunto predefinido de matrices de pre-codificación, denominado *libro de códigos* (*codebook*).

Una variante de multiplexación espacial consiste en transmitir hacia o desde varios terminales móviles en los mismos recursos de tiempo y frecuencia. Esta

modalidad, denominada *multiplexación espacial multiusuario* (*Multiuser MIMO*, MU-MIMO), es similar a la descrita anteriormente, que puede denominarse SU-MIMO (*Single-User MIMO*), con la diferencia de que las múltiples antenas en el lado de los móviles están distribuidas entre varios de estos terminales, y cada uno recibe un solo flujo espacial. Esta técnica tiene la ventaja de lograr de manera automática la dispersión angular necesaria y de no requerir muchas antenas en cada terminal, pero tiene el inconveniente de ser mucho más sensible a errores en la información de realimentación [33, apart. 11.2.3].

LTE contempla, desde su versión inicial (*release* 8 de las especificaciones del 3GPP), el uso de técnicas MIMO, incluyendo multiplexación espacial en sentido descendente (en sentido ascendente la primera versión de LTE no contempla multiplexación espacial). Las variantes de MIMO definidas en el enlace descendente de LTE son las siguientes [32, apart. 16.6] [33, apart. 9.2.2 y 11.2] [37].

- Transmisión desde una sola antena⁵: en este modo no se utiliza diversidad de transmisión ni multiplexación espacial.
- Diversidad de transmisión en bucle abierto: se define para 2 ó para 4 antenas. En el caso de 2 antenas se utiliza *Space-Frequency Block Coding* (SFBC), que es el método de Alamouti en espacio-frecuencia.

Para 4 antenas, dado que no existe una generalización directa del método de Alamouti⁶, se utiliza una combinación de SFBC con *Frequency-Shift Transmit Diversity* (FSTD). La técnica FSTD consiste en transmitir en subportadoras diferentes desde antenas diferentes, sin que dos antenas transmitan a la vez en las mismas subportadoras.

- Multiplexación espacial en bucle cerrado: se define para 2 ó para 4 antenas, con un número máximo de flujos espaciales igual al número de antenas. El móvil indica a la base el número de flujos preferido y la matriz de pre-codificación más adecuada, de entre un conjunto predefinido de posibles matrices. La base puede no seguir las indicaciones del móvil, por lo que debe señalar cuál es la pre-codificación aplicada. A partir de esta información, y de la estimación de los canales de propagación, el móvil puede aplicar el post-procesado espacial en recepción.

⁵Las especificaciones utilizan el término “puerto de antena” (*antenna port*) para referirse a cada uno de los elementos de transmisión. Un puerto de antena se define por la presencia de una señal de referencia que es específica de dicho puerto, y a partir de la cual el móvil puede medir el canal de propagación correspondiente. Un puerto de antena no tiene por qué corresponder con una sola antena física. En este documento se utiliza la denominación “antena” para simplificar, bien entendido que se trata realmente de un puerto de antena, y no necesariamente de una antena física.

⁶Concretamente, no existen códigos en espacio-tiempo (o espacio-frecuencia) con tasa 1 para más de 2 antenas [35, pág. 116].

2.1. SITUACIÓN DE LTE, CARACTERÍSTICAS Y ESTADO DE LA TÉCNICA

- Multiplexación espacial en bucle abierto, también denominada *large-delay cyclic delay diversity*: se define para 2 ó para 4 antenas, y utiliza matrices de pre-codificación independientes del estado del canal. El móvil indica, no obstante, el número de flujos espaciales recomendado (por lo cual este método no es estrictamente en bucle abierto).
- Conformación de haz en bucle cerrado: es un caso particular de la multiplexación espacial en bucle cerrado, en el que el número de flujos es 1.
- Conformación de haz en bucle abierto: la estación base aplica un vector de pre-codificación espacial arbitrario, es decir, no limitado a un conjunto predefinido de vectores. El vector de pre-codificación se elige sin ninguna realimentación por parte del móvil. Un posible criterio para la elección es utilizar estimaciones de la dirección de llegada en el enlace ascendente. La base, en vez de indicar al móvil el vector empleado, transmite una señal de referencia específica para dicho móvil, a la cual aplica la misma pre-codificación. De esta forma el móvil es capaz de estimar directamente el canal de propagación incluyendo el efecto de la pre-codificación espacial.
- Multiplexación espacial multiusuario (MU-MIMO) en bucle cerrado. La base transmite un solo flujo para cada usuario, aplicando matrices de pre-codificación diferentes para móviles diferentes, a partir de información realimentada por éstos.

El modo de transmisión utilizado en una conexión es seleccionado por la estación base. La decisión debe tener en cuenta las características del canal y las restricciones del móvil. Existen varias categorías de terminales móviles, las cuales definen las funcionalidades que pueden utilizar. En lo que se refiere a MIMO, la categoría determina la capacidad de multiplexación espacial en sentido descendente [32, apart. 19.6].

Técnicas de retransmisión híbridas con combinación Las técnicas de retransmisión híbridas (*Hybrid Automatic Repeat Request*, HARQ) consisten en el uso conjunto de códigos detectores de errores, empleados para identificar bloques recibidos incorrectamente, y códigos correctores, utilizados para aumentar la probabilidad de recepción correcta del bloque [38]. Dentro de estas técnicas existen varias modalidades [39] [40]. La principal distinción se establece entre métodos en los que cuando un bloque se recibe incorrectamente se descarta y se solicita su retransmisión, y métodos en los que cuales el bloque erróneo se almacena y se combina con las versiones posteriores del mismo obtenidas mediante retransmi-

sión. Esta segunda modalidad es más eficiente, ya que no se descarta la información contenida en versiones anteriores del bloque.⁷

En LTE se utilizan técnicas de retransmisión híbridas con combinación.⁸ Dentro de éstas, existen dos variantes:

- **Combinación Chase:** las retransmisiones contienen bits de canal idénticos a los originales, por lo que pueden combinarse bit a bit (usando decisiones *soft*) con la transmisión original. Cada retransmisión proporciona un incremento de la SINR total.
- **Redundancia incremental:** las retransmisiones pueden contener bits de canal diferentes (generados a partir de los mismos bits de fuente), que incrementan la redundancia de los originales. Por tanto, al retransmitir resulta una codificación de menor tasa. Cada retransmisión proporciona no sólo un incremento de la SINR, sino además una ganancia de codificación.

La redundancia incremental ofrece en general mejores prestaciones, pero requiere mayor capacidad de almacenamiento para los bits de canal en recepción (*soft buffer*) [42, apart. 12.5.3]. Cada categoría de móvil determina un tamaño máximo del *soft buffer*, el cual limita las tasas binarias en las que puede utilizarse redundancia incremental en sentido descendente.

Modulaciones 16-QAM y 64-QAM LTE utiliza las modulaciones QPSK (*Quaternary Phase-Shift Keying*), 16-QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) ó 64-QAM en sentido descendente. En sentido ascendente la categoría del terminal determina si se puede utilizar cualquiera de las tres modulaciones o sólo las dos primeras.

El uso de modulaciones de amplitud y fase con mayor número de símbolos permite incrementar de forma directa la tasa binaria, a costa de menor robustez frente al ruido y a las interferencias. La elección de la modulación debe hacerse en función de las condiciones instantáneas del enlace.

Cuando se transmite con 16-QAM o con 64-QAM, debido al empleo conjunto de retransmisiones híbridas con combinación, se utilizan técnicas de *reorganización de la constelación* (*constellation rearrangement*). Estas técnicas consisten en modificar la correspondencia entre bits y símbolos de la modulación, para evitar que los bits recibidos con mayor fiabilidad sean los mismos en retransmisiones sucesivas. De esta forma se logra reducir la tasa de error de bloque tras la combinación de retransmisiones, especialmente en el caso de combinación Chase [38].

⁷No descartar información prematuramente es una de las ideas clave en el diseño de cualquier sistema de transmisión digital [41].

⁸En muchas publicaciones se utiliza, de forma poco precisa, la denominación “HARQ” para referirse a las técnicas de retransmisión híbridas con combinación.

Adaptación de la tasa binaria al canal radio En un entorno de propagación móvil el canal experimenta variaciones de atenuación o *desvanecimientos* debidos al fenómeno de multitrayecto [30, cap. 3]. En general, estas variaciones ocurren de manera muy rápida, y además son sensibles a la frecuencia. El grado de variación del canal en tiempo y en frecuencia viene dado por las características físicas del entorno de propagación, y se puede describir mediante el perfil retardo-potencia, que caracteriza la selectividad en frecuencia (o dispersión temporal), y el perfil Doppler, que caracteriza la variación temporal (o dispersión en frecuencia) [43, cap. 14].

Para hacer frente a las variaciones del canal, los sistemas de comunicaciones móviles utilizan en general técnicas de *adaptación de enlace* (*link adaptation*), que consisten en modificar algún parámetro de la transmisión en función de los cambios del canal, de acuerdo con un criterio prefijado. Por ejemplo, los canales dedicados de UMTS utilizan control de potencia, que es una técnica de adaptación al enlace en la que se varía la potencia transmitida para mantener una tasa binaria y una tasa de bloques erróneos (*Block Error Rate*, BLER) aproximadamente constantes. LTE y HSDPA utilizan un enfoque diferente, que consiste en modificar la tasa binaria transmitida en función del estado del canal radio. El principio es transmitir con mayor tasa en los instantes en que el canal sea más favorable, y reducir la tasa cuando el canal sea menos propicio. Se utilizan así las variaciones del canal radio de forma “*oportunist*a”. Ello permite lograr mayores tasas binarias medias que las obtenidas empleando control de potencia [32, apart. 7.1].

En general, en los sistemas basados en OFDM la adaptación de tasa puede realizarse no sólo en el dominio del tiempo, sino también en el de la frecuencia, utilizando un formato de transmisión diferente en las distintas subportadoras. Sin embargo, en LTE no se explota esta posibilidad, ya que en su momento se analizaron las mejoras derivadas de este enfoque y se consideró que no justificaban el incremento de complejidad asociado [33, apart. 10.2].

La modificación de la tasa binaria en LTE se consigue variando ciertos parámetros que afectan al formato de transmisión:

- tasa de codificación de canal (grado de repetición o de *puncturing* aplicado al código básico, que es un turbo-código de tasa 1/3);
- modulación (QPSK, 16-QAM ó 64-QAM).

Adicionalmente, en el caso de usar técnicas MIMO, se pueden variar también los siguientes aspectos:

- número de flujos espaciales transmitidos;
- matriz de pre-codificación utilizada en el transmisor.

Para llevar a cabo la adaptación, el terminal móvil debe estimar el *estado del canal radio* y solicitar a la estación base el formato de transmisión más adecuado. El estado del canal se define por medio de un conjunto de parámetros, relacionados con los aspectos de la transmisión susceptibles de ser modificados, mencionados anteriormente. Los parámetros que caracterizan el estado del canal en LTE son [32, apart. 19.2.5]:

- *Channel Quality Indication* (CQI): representa el formato de transmisión, en términos de modulación y tasa de codificación. Existen 15 valores de CQI, cada uno de los cuales corresponde a un formato de transmisión. Los CQI están ordenados por tasa binaria bruta creciente.
- *Rank Indication* (RI): número de flujos que se multiplexan espacialmente hacia un mismo móvil, o “rango” del canal, comprendido entre 1 y 4.
- *Precoding Matrix Index* (PMI): matriz o vector de pre-codificación aplicado en el transmisor. Este parámetro es un índice a una matriz o vector, de entre un conjunto de posibles matrices o vectores predefinidos. Este conjunto es diferente para cada combinación de número de antenas transmisoras y número de flujos.

El móvil debe indicar, de acuerdo con las especificaciones, el número de flujos (RI) permitidos por el canal; para ese número de flujos, la matriz o vector de pre-codificación (PMI) que más se adecua, de las disponibles, al estado del canal; y, en función de esos parámetros, el formato de transmisión (CQI) de mayor tasa binaria que puede aplicarse a cada flujo manteniendo una BLER en primera transmisión no superior al 10 %. Para aplicar estos criterios, la tasa binaria y la BLER se consideran definidas sin tener en cuenta las retransmisiones; es decir [44, apart. 7.2.3]:

- la tasa binaria es la tasa bruta correspondiente al formato utilizado, independientemente de si se recibe correcta o incorrectamente;
- la BLER se refiere a cada bloque transmitido, sin tener en cuenta que al combinarse varios bloques (retransmisiones híbridas con combinación) la BLER resultante puede ser menor.

Por su parte, la estación base puede seguir o no las indicaciones del móvil a la hora de determinar el formato utilizado en la transmisión. Pueden aplicarse, por ejemplo, correcciones en la base para desplazar el punto de trabajo, es decir, para conseguir una BLER diferente al valor de referencia del 10 % [45] [46].

Dado que las características del canal dependen de la frecuencia y además varían en el tiempo, el envío de estos parámetros debe hacerse, en general, en función de la frecuencia y con un tiempo de actualización suficientemente pequeño.

2.1. SITUACIÓN DE LTE, CARACTERÍSTICAS Y ESTADO DE LA TÉCNICA

Además, no es suficiente con hacer una estimación del estado actual del canal, sino que es necesaria una predicción, ya que, debido al retardo asociado al envío, el canal radio puede haber cambiado cuando se utilice el formato de transmisión solicitado.

En LTE el ancho de banda total de transmisión se divide en varias subbandas, y en cada subbanda se puede enviar información diferente sobre los parámetros del canal. El tamaño de la subbanda, por tanto, determina la resolución en frecuencia para el envío de información sobre el canal. El tiempo entre envíos puede ser fijo (envío periódico de informes) o variable (aperiódico). En cuanto a los valores enviados propiamente dichos, pueden aplicarse diferentes estrategias de cuantificación (utilizando algún tipo de codificación diferencial). Teniendo en cuenta todas estas opciones, se definen diferentes modos de envío de la información de estado del canal [33, apart. 10.2.1 y 11.2.2.4], que corresponden a diferentes valores de compromiso entre tiempo de actualización, resolución en frecuencia y carga de señalización. Por otro lado, en función del modo de transmisión empleado pueden no utilizarse algunos de los tres parámetros señalados. Por ejemplo, para conformación de haz en bucle cerrado no es necesario indicar el RI, y se envía un sólo valor del CQI, ya que existe un sólo flujo espacial.

Planificación de usuarios dependiente del canal radio La tarea de planificación de usuarios consiste en la asignación de recursos de transmisión por parte de la estación base a los diferentes usuarios que compiten por un canal compartido. En LTE todos los recursos de tráfico son compartidos, es decir, no existen canales dedicados como en tecnologías anteriores. La planificación de usuarios es la herramienta que permite asignar los recursos de forma adecuada. La unidad mínima de asignación en LTE es un *par de bloques de recursos* consecutivos. Un *bloque de recursos* (*resource block*, RB) es una celda del plano tiempo-frecuencia con una duración de 0,5 ms (*intervalo temporal*) y un ancho de banda de 12 subportadoras, es decir, 180 kHz. La asignación, por tanto, se lleva a cabo en celdas de 1 ms (*subtrama*) por 180 kHz.

En general, en la planificación de usuarios deben tenerse en cuenta sus requisitos de tasa binaria y retardo admisible. Adicionalmente, la planificación de usuarios puede tener en cuenta el estado del canal radio para aprovechar de forma óptima las variaciones por multitrayecto. Se sigue una estrategia oportunista similar a la mencionada en relación con la adaptación de tasa binaria, siguiendo el principio básico de transmitir en cada *instante* al usuario o usuarios que tengan las mejores condiciones en su canal radio. En LTE, gracias al uso de OFDM, existe también la posibilidad de realizar la planificación en función de la *frecuencia*, asignando a cada usuario un conjunto de subportadoras en las que la atenuación del canal sea pequeña. De este modo se aprovechan de forma favorable las varia-

ciones de los canales de propagación de los usuarios no sólo en el tiempo, sino también en frecuencia.

La planificación dependiente del canal aprovecha las variaciones del canal multitrayecto para lograr en cada intervalo de tiempo y/o frecuencia la mayor tasa binaria posible. Esto da lugar a una mejora de capacidad respecto a sistemas que no utilizan este enfoque, conocida como ganancia por *diversidad multiusuario*. No obstante, en la práctica la ganancia alcanzable puede estar limitada por criterios de retardo o de equidad entre usuarios, que obligan a modificar la asignación de recursos. Por otro lado, igual que ocurre con la adaptación al canal, para que esta técnica sea efectiva debe realizarse con un periodo de actualización comparable o menor que el tiempo de coherencia del canal, y con una resolución en frecuencia comparable o menor que el ancho de banda de coherencia del canal. En la práctica las mayores ganancias se obtienen para velocidades de desplazamiento reducidas o canales que presenten selectividad en frecuencia.

Las técnicas de planificación de usuarios dependientes del canal radio están muy relacionadas con las de adaptación al canal de la tasa binaria. Los mismos parámetros de realimentación del estado del canal enviados por el móvil para la adaptación de tasa pueden utilizarse para llevar a cabo la planificación de usuarios en la base; y ambas técnicas funcionan de forma análoga, tratando de explotar las variaciones del canal multitrayecto para incrementar la capacidad. Los algoritmos correspondientes deben trabajar de forma conjunta, hasta tal punto que a menudo se consideran como una misma funcionalidad [32, apart. 7.2], la cual puede entenderse como una adaptación al canal generalizada al caso multiusuario.

2.1.3. Estado de la técnica

Como paso previo a la investigación es necesario conocer el estado actual de la técnica; esto es, debe analizarse qué estudios existen y qué algoritmos se utilizan o se han propuesto en el campo de la adaptación de tasa y planificación de usuarios para el enlace descendente de LTE. A continuación se repasa la información disponible en este sentido.

Adaptación de tasa binaria La mayoría de los algoritmos de adaptación de tasa binaria propuestos para LTE están inspirados en los existentes para HSDPA. El proceso de adaptación se suele dividir en dos etapas o niveles, que se pueden denominar interno (*Inner-Loop Link Adaptation*, ILLA) y externo (*Outer-Loop Link Adaptation*, OLLA) [46] [47]:

- El *nivel interno* consiste en la elección del formato de transmisión en función del estado instantáneo del canal. A partir de una medida o predicción de la SINR del canal, se selecciona el mayor CQI que cumple el criterio

2.1. SITUACIÓN DE LTE, CARACTERÍSTICAS Y ESTADO DE LA TÉCNICA

de BLER no superior a un cierto valor objetivo. Para ello se utilizan unos umbrales que definen qué valores de SINR se asocian a cada CQI. El CQI a su vez determina el formato de transmisión.

- El *nivel externo* se ocupa del ajuste de los umbrales en función de las condiciones generales del canal. La necesidad de este ajuste se deriva del hecho de que los valores más adecuados de los umbrales no son fijos, sino que dependen de la estadística del canal. Por ejemplo, a velocidades del móvil más altas los errores entre la SINR predicha y la SINR real son mayores, lo cual tiende a incrementar la BLER; ello debe compensarse eligiendo CQI más bajos, es decir, utilizando umbrales más altos.

Este enfoque basado en dos niveles es análogo al utilizado para el control de potencia en bucle cerrado en UMTS:

- La selección del CQI o formato de transmisión en función de la SINR instantánea (nivel interno) se corresponde con la orden de control de potencia en bucle interno, la cual se genera también en función de la SINR instantánea. Estas acciones tienen lugar de forma rápida, pues deben seguir las variaciones de atenuación instantánea del canal multitrayecto.
- El ajuste de los umbrales usados para la elección del CQI (nivel externo) se corresponde con la actuación del bucle externo, que consiste en el ajuste de la SINR de referencia utilizada para generar la orden de control de potencia. Estas acciones se llevan a cabo de forma más lenta, pues deben adaptarse a cambios en la estadística del canal multitrayecto, es decir, en las condiciones de propagación.

La mayoría de los estudios publicados proponen para el nivel externo variantes del algoritmo “de salto” (o “*BLER-based*”) utilizado en el bucle externo de control de potencia en UMTS. Este método consiste en modificar los umbrales tras recibir cada bloque, aplicando ajustes diferentes en función de si el bloque decodificado contiene errores o no. La existencia de errores se conoce gracias al código de redundancia cíclica (*Cyclic Redundancy Check*, CRC) [32, apart. 15.3] incluido en cada bloque, el cual actúa como código detector. Es bien conocido que este algoritmo puede presentar problemas derivados de su baja velocidad de convergencia, pero en este caso no son significativos dado que la BLER objetivo es relativamente alta.

Para el nivel interno, existen estudios que proponen técnicas de predicción de canal aplicables a la estimación de la SINR [48].

Planificación de usuarios El algoritmo básico de planificación de usuarios dependiente del canal radio es el que se conoce como *Proportional Fair* (PF) [35, apart. 6.7.1]. Para entender la importancia de este algoritmo es conveniente describir antes otros dos, conocidos respectivamente como criterio de *máxima SINR* y de *asignación correlativa* (*round robin*). Estos dos métodos, aunque tienen menor interés práctico, se emplean habitualmente como referencia para valorar las prestaciones de otros algoritmos. El de máxima SINR consiste en transmitir en cada unidad de asignación (bloque de recursos, en el caso de LTE) al usuario que tiene unas mejores condiciones, esto es, mayor SINR instantánea. Este algoritmo maximiza la capacidad, a costa de no tener en cuenta en absoluto la equidad entre usuarios. Así, puede ocurrir que los usuarios más alejados de la base nunca reciban recursos. El algoritmo de asignación correlativa reparte los recursos por igual entre los diferentes usuarios, independientemente del estado de sus canales de propagación. Resuelve por tanto el problema de falta de equidad, pero al no tener en cuenta las variaciones por multitrayecto no aprovecha la diversidad multiusuario.

El algoritmo PF se suele considerar un buen compromiso entre aprovechamiento de las variaciones de los canales y equidad entre usuarios. Se basa en calcular para cada usuario una métrica, definida como la relación entre la tasa binaria instantánea permitida por el canal y una media temporal de la tasa realmente alcanzada por el móvil. La primera se deduce a partir de la información de realimentación (CQI y parámetros asociados), mientras que la segunda se obtiene aplicando un filtro paso bajo (típicamente un filtro recursivo de un solo polo) con una constante de tiempo en torno a 1 segundo. El usuario que maximiza la métrica es planificado por la base. En esencia, lo que se consigue con ello es planificar a cada usuario en los instantes en que su canal de propagación tiene una ganancia alta en relación con los valores alcanzados por él mismo en otros instantes. Con ello se logra en parte utilizar favorablemente las variaciones del canal, manteniendo a la vez un cierto grado de equidad. Este algoritmo maximiza la suma de los logaritmos de las tasas binarias medias obtenidas por los usuarios [35, apart. 6.7.1].

En LTE, debido a la utilización de OFDM, el algoritmo básico PF puede ampliarse para explotar no sólo las variaciones del canal en el tiempo, sino también en frecuencia. Esta modificación del algoritmo se conoce como *Frequency-Domain Proportional Fair* (FDPF), y proporciona, en determinadas condiciones, incrementos sustanciales de capacidad [47] [49] [50].

Los algoritmos PF y FDPF pueden generalizarse de varias maneras. Una posibilidad es introducir un exponente arbitrario en el numerador o denominador al calcular la métrica, con lo que se consigue modificar el compromiso entre capacidad y equidad [51] [52]. En vez de aplicar un exponente pueden utilizarse otras funciones matemáticas, que permiten lograr ligeras mejoras [52].

Una línea de trabajo relacionada con la planificación de usuarios es el estudio de la posible conveniencia de dejar parte de los recursos de la base sin asignar

(*fractional load*) [49]. En un sistema celular, los recursos no ocupados por una base significan menor interferencia para las células o sectores vecinos, con lo cual dejar una parte de los recursos libres, en función de la carga de tráfico de las bases, puede tener un efecto beneficioso global sobre la capacidad de la red. Este tipo de estrategias están relacionadas con las técnicas de reutilización de frecuencias y coordinación de interferencias [53].

Existen pocos estudios sobre la distribución más adecuada de potencia de la estación base entre los bloques de recursos, o entre los distintos usuarios. La mayoría de los análisis sobre planificación consideran una potencia fija por bloque de recursos, tanto en el tiempo como en la frecuencia. Puede ser más conveniente, no obstante, utilizar otras distribuciones de potencia, siguiendo estrategias de tipo oportunista: asignar más potencia en los bloques de recursos, o a los usuarios, que presenten menor atenuación instantánea.

Influencia del uso de MIMO La utilización de técnicas MIMO, y especialmente de multiplexación espacial, afecta al modo en que deben realizarse las funciones de adaptación de tasa binaria y planificación de usuarios. En cuanto a la adaptación de tasa, al introducir MIMO existen parámetros de transmisión nuevos que deben seleccionarse; además, en el caso de existir varios flujos es necesario elegir el formato para cada uno. El nivel externo (OLLA) suele realizarse como un ajuste de los umbrales aplicado en común a todos los flujos [46], y calculado de la forma habitual a partir de los CRC's de los bloques recibidos, sólo que incorporando la información de los múltiples flujos. En el nivel interno (ILLA) la parte más crítica es la elección del número de flujos. Existen varios métodos, que representan diferentes puntos de compromiso entre prestaciones obtenidas y señalización necesaria [46] [54] [55].

Los algoritmos de planificación de usuarios también deben modificarse en el caso de usar multiplexación espacial. Existen generalizaciones de los métodos PF y FDPF para multiplexación espacial SU-MIMO [46] [56]. En el caso de FDPF, la generalización debe tener en cuenta la restricción de que el número de flujos espaciales tiene que ser el mismo para todos los bloques de recursos asignados a un móvil, según las especificaciones de LTE. El problema de encontrar la planificación óptima no puede resolverse en la práctica debido a su complejidad computacional, por lo que deben buscarse métodos subóptimos [56]. Para MU-MIMO se han propuesto también planificadores de usuarios basados en FDPF [57].

En la planificación de usuarios con multiplexación espacial suele considerarse que la potencia transmitida a cada usuario se reparte por igual entre todos sus flujos espaciales [54]. No obstante, esta distribución no es necesariamente la más adecuada; en general, puede ser conveniente utilizar distribuciones de potencia dependientes del estado del canal para mejorar las prestaciones.

Técnicas de simulación La complejidad de las redes celulares LTE obliga a recurrir a la simulación como parte esencial del análisis de prestaciones. Para reducir la carga de cálculo asociada a la simulación, se suele dividir ésta en dos etapas o niveles de abstracción, que se denominan nivel de enlace y nivel de sistema [58, cap. 7]. En el primero se modelan los aspectos que influyen en la transmisión y recepción de la señal entre la base y el móvil, tales como modulación, codificación y canal multitrayecto. El resultado de esta etapa es un conjunto de parámetros que caracterizan el enlace. El nivel de sistema modela los fenómenos de más alto nivel relacionados con el tráfico y la movilidad de los usuarios en la red, incluyendo aspectos como pérdida de propagación, desvanecimiento por sombra y algoritmos de gestión de recursos radio. Cada enlace base-móvil, en vez de simularse detalladamente, se representa mediante una caracterización basada en el nivel de enlace, utilizando los parámetros allí obtenidos, que actúan como interfaz o conexión entre los dos niveles de simulación.

La utilización de OFDM y de técnicas avanzadas de gestión de recursos radio, como adaptación de tasa binaria y planificación de usuarios, tiene una influencia importante sobre el planteamiento de la simulación en LTE, principalmente en dos aspectos. En primer lugar, la caracterización del estado del canal en tiempo y en frecuencia es compleja, en comparación con sistemas anteriores. Las técnicas de interfaz enlace-sistema empleadas en UMTS, del tipo *actual-value interface* [59], dejan de ser válidas, y deben sustituirse por otras más avanzadas. La más utilizada se basa en *Exponential Effective SINR Mapping* (EESM) [60] [61]. En segundo lugar, el uso de técnicas como la planificación de usuarios dependiente del canal radio introduce una *dependencia entre usuarios en el nivel de enlace*, lo cual lleva a tener que simular múltiples conexiones en este nivel para caracterizar adecuadamente el comportamiento de dichas técnicas. Por ello los simuladores de enlace de LTE, en vez de considerar como en UMTS una sola conexión (o como mucho la conexión de un móvil con varias bases en traspaso con continuidad), típicamente consideran varias conexiones o incluso varias células [62], para modelar sus interacciones.

De acuerdo con lo señalado, para el estudio propuesto en este proyecto de investigación es necesario disponer de un simulador de nivel de enlace. En general, las diferentes compañías que investigan en este campo (sobre todo fabricantes de equipos y operadores) utilizan simuladores propios [47] [62], de uso restringido. En la Universidad Técnica de Viena, por otro lado, se han desarrollado dos simuladores, de enlace y de sistema respectivamente [62] [63], y sus autores los han hecho públicos para uso por parte de otros investigadores, que de esta forma pueden centrarse en evaluar las técnicas o algoritmos objeto de su estudio, utilizando las funciones básicas (modulación, codificación, modelos de canal) ya desarrolladas en estos simuladores.

En las simulaciones de enlace se modela de forma explícita, entre otros aspec-

tos, el canal multitrayecto; en el caso del estudio propuesto, el funcionamiento de la planificación de usuarios y de la adaptación de tasa binaria se basa en la adaptación a las variaciones por multitrayecto, por lo que es imprescindible incluir este aspecto en la simulación. Ello tiene una influencia considerable sobre la carga de cálculo y el tiempo de ejecución. Aunque se han propuesto métodos para modelar de forma aproximada el efecto del multitrayecto sin necesidad de simularlo explícitamente [64], éstos no son aplicables para obtener resultados en el nivel de enlace; además, requieren una labor de calibración para cada conjunto de condiciones de simulación consideradas (tales como velocidad de desplazamiento de los usuarios o algoritmo de planificación utilizado).

En el estudio de algoritmos de planificación de usuarios y de adaptación de tasa binaria debe modelarse el método de realimentación utilizado (grado de resolución en tiempo y en frecuencia, así como cuantificación en los valores enviados) [45]. En función de cuál sea éste puede ser más conveniente utilizar unas estrategias u otras, tanto de adaptación de tasa como de planificación de usuarios. Por otro lado, para considerar MIMO es importante modelar adecuadamente el canal no sólo en los dominios del tiempo y de la frecuencia, sino también en el espacial. Existen para ello modelos ampliamente aceptados, que son los que usan la mayoría de los simuladores [62] [65, apart. A.1.3]. Estos modelos se basan generalmente en líneas de retardo con varias tomas, y especifican además matrices de covarianza que describen la distribución de potencia y correlación entre los desvanecimientos correspondientes a cada pareja de antenas transmisora y receptora [65, apart. A.1.3].

El GTIC-Radiocomunicaciones dispone de un simulador de enlace (en Matlab), basado en el de la Universidad Técnica de Viena referido anteriormente, sobre el que se han hecho varias modificaciones para poder analizar algoritmos de adaptación de tasa binaria y planificación de usuarios [52]:

- Se ha incluido en el simulador la realimentación del estado del canal, considerando varios métodos.
- Se ha añadido la funcionalidad de adaptación de tasa binaria. Se han programado varios algoritmos de bucle interno, que difieren en cómo se obtiene un formato único a partir de la información enviada por el móvil para diferentes subbandas; y se han incorporado varios algoritmos de adaptación de tasa en bucle externo (OLLA) que permiten cumplir el criterio de BLER especificado por el 3GPP.
- Se han incluido varios algoritmos de planificación y se han mejorado los que existían en el simulador. Los algoritmos nuevos son variaciones y ampliaciones del FDPF.

- Se han realizado diversas correcciones en colaboración con los autores del programa original.

Estas modificaciones se realizaron inicialmente sin considerar multiplexación espacial. Recientemente se ha iniciado el trabajo para adaptar el simulador al caso de multiplexación espacial.

2.2. Motivación y justificación del proyecto

Una vez descritos el estado actual y las características básicas de la tecnología LTE, y revisado el estado de la técnica (§2.1), en este apartado se detalla la motivación del proyecto y se justifica la importancia del tema de investigación seleccionado. Para ello se argumenta, a continuación, que el tema es relevante; que la investigación es viable y aplicable; y que el grupo está en condiciones idóneas para llevarla a cabo.

Relevancia del tema La investigación propuesta en este Proyecto Investigador tiene como fin mejorar los métodos de *adaptación al canal radio y planificación de usuarios dependiente del canal* existentes para LTE. Los dos tipos de métodos referidos están íntimamente relacionados, como se ha mencionado en §2.1.2, y deben trabajar de forma conjunta. Por otro lado, ambas técnicas determinan en gran medida la capacidad de las redes LTE [32, apart. 14.2]. De acuerdo con esto, es evidente que tiene gran interés estudiar estas dos técnicas, y que es imprescindible hacerlo de forma conjunta. Una mejora de los algoritmos utilizados redundaría en un incremento de prestaciones en la transmisión, con los consiguientes beneficios para la sociedad.

El estudio se centra en el sentido de transmisión descendente. Si bien los resultados obtenidos pueden ser hasta cierto punto aplicables a los dos sentidos, existen diferencias en el modo de funcionamiento que hacen necesario centrar el estudio en uno de los dos. La elección del sentido descendente viene motivada por la mayor exigencia que previsiblemente va a existir en éste en cuanto a tasas de transmisión y capacidad.

Aplicabilidad de la investigación En consonancia con el criterio general señalado en §2.1.1, las especificaciones del 3GPP no imponen ningún algoritmo concreto de planificación de usuarios o de adaptación de tasa binaria [32, apart. 15.2.2]. Ello deja abierta la posibilidad de utilizar diferentes algoritmos para obtener prestaciones cada vez mejores, y promueve la investigación en este campo, ya que las técnicas o algoritmos diseñados pueden aplicarse inmediatamente a las redes LTE.

Disponibilidad de herramientas de medida Como parte del estudio, es necesario conocer en primer lugar los algoritmos que se han propuesto y que se están utilizando en las redes actuales, o cuyo uso se prevé en las primeras redes desplegadas. Aunque se han publicado numerosos resultados en el ámbito de la planificación de usuarios y adaptación de tasa binaria en LTE (véase §2.1.3), habitualmente los fabricantes no dan a conocer todos los detalles de los algoritmos que utilizan en sus equipos. En consecuencia, resulta muy importante para el proyecto disponer de herramientas de medida que permitan caracterizar el comportamiento de las redes. Si bien es muy difícil llegar a conocer de esta forma cuáles son los algoritmos utilizados, sí pueden caracterizarse las prestaciones alcanzadas con los mismos. La tecnología LTE está comenzando a implantarse ya en algunos países, como se ha mencionado en §2.1.1, y en otros su despliegue está previsto en un plazo de tiempo corto.

En España existen actualmente “maquetas” consistentes en despliegues de red de extensión limitada, en fase de pruebas. Por otro lado, ya existen algunos terminales móviles compatibles, y las principales herramientas de medida de la interfaz radio de redes móviles incluyen soporte para LTE. Como ejemplos pueden mencionarse las herramientas Romes, del fabricante Rohde & Schwarz; E6474A, de JDSU (Jones, Duck and Straus/Sinclair Uniphase), anteriormente de Agilent Technologies; o Nemo, de Anite, anteriormente de Nemo Technologies.

Por tanto, puede contarse en el proyecto con la posibilidad de realizar medidas de la interfaz radio LTE en redes reales.

Experiencia del grupo La investigación se enmarca en una de las líneas que viene desarrollando el GTIC-Radiocomunicaciones en los últimos años (véase §1.4). La propuesta se basa en la experiencia adquirida en trabajos previos de investigación del grupo, especialmente los desarrollados en colaboración con la empresa Top Optimized Technologies, en el ámbito del control de potencia, adaptación al enlace y planificación de usuarios en UMTS, HSDPA y LTE. En todos estos trabajos el candidato ha tenido una implicación muy intensa.

Los proyectos desarrollados por el GTIC-Radiocomunicaciones en relación con el control de potencia en UMTS, adaptación de enlace en HSDPA y planificación de usuarios en HSDPA y LTE, ya señalados en §1.4.2, han dotado al grupo, y en particular al candidato, de una valiosa experiencia en este campo, incluyendo:

- Desarrollo de algoritmos de bucle externo de control de potencia para UMTS, que mejoran las prestaciones de los algoritmos actualmente utilizados. Estos algoritmos han dado lugar a varias patentes, y actualmente están en fase de integración en equipos reales (véase §1.4.2).
- Participación en el proceso de estandarización del 3GPP, dentro del grupo de trabajo sobre *Radio Performance and Protocol Aspects* (RAN WG4).

- Desarrollo completo de varios simuladores de enlace y de sistema (UMTS, HSDPA); integración de algoritmos en simuladores externos (UMTS, LTE); adaptación y ampliación de simuladores desarrollados por otros investigadores (LTE).
- Realización de medidas en redes reales UMTS con varios tipos de herramientas: TEMS (*Test Mobile System*; de Ascom), XCAL-W (*Extensive CDMA Advanced Logger for Wide Band*; de Couei), Nemo, CAIT (*CDMA Air Interface Tester*, de Qualcomm), E6474A (mencionado anteriormente); y realización de pruebas en laboratorio con maquetas de nodos B.
- Colaboración con varios fabricantes y operadores en la integración de algoritmos en equipos reales.

La experiencia indicada representa una base sólida para abordar el proyecto de investigación. Por otro lado, el grupo viene manteniendo conversaciones con la empresa mencionada, la cual ha manifestado su interés por el tema de trabajo propuesto. De hecho, se ha iniciado la búsqueda de financiación, y se espera poder comenzar en breve con las actividades.

2.3. Objetivos

El *objetivo general* del proyecto es el diseño de nuevos algoritmos de planificación de usuarios y adaptación al canal radio para el sentido descendente LTE, que permitan mejorar las prestaciones obtenidas con los algoritmos actuales. Este objetivo general se desglosa en los siguientes *objetivos específicos*.

1. Desarrollo de un simulador de nivel de enlace para LTE, que incluya todos los aspectos relevantes para el análisis de algoritmos de adaptación de tasa binaria y planificación de usuarios. En lo posible, se partirá de un simulador previamente disponible, ampliándolo y adaptándolo a las necesidades del proyecto.
2. Análisis de las técnicas y algoritmos existentes o propuestos en la literatura especializada.
3. Propuesta, estudio y evaluación, por medio de simulación, de nuevos algoritmos de adaptación de tasa binaria y planificación de usuarios para LTE.
4. Divulgación de los resultados de la investigación en congresos o revistas, así como, en su caso, foros de estandarización internacionales.

En lo concerniente al objetivo específico 1, se prevé utilizar como base el simulador referido en §2.1.3, que ha sido parcialmente desarrollado por el grupo, y que se ha utilizado en trabajos anteriores.

Debe señalarse que parte del trabajo correspondiente al objetivo específico 2 ya ha sido llevado a cabo por el grupo en su labor investigadora reciente, por lo que dicho objetivo debe entenderse como una ampliación del análisis indicado. En concreto, hasta ahora no se ha abordado un estudio profundo de las técnicas de adaptación de tasa binaria en general, y tampoco se han analizado las técnicas de planificación de usuarios en presencia de multiplexación espacial.

2.4. Beneficios esperados

Beneficios para la sociedad Los resultados del proyecto pueden ser de gran interés para operadores de red y fabricantes de equipos. Dentro de las actividades está prevista la difusión de los resultados, con objeto de dar a conocer el trabajo entre empresas que puedan estar interesadas. La posibilidad de incorporación en redes comerciales de las técnicas que se desarrollen se ve favorecida por el hecho de que la tecnología LTE aún no se ha desplegado de forma generalizada.

El fin último del proyecto es el diseño de nuevos algoritmos que permitan mejorar las prestaciones de LTE. Las ventajas que para la sociedad podrían derivarse de la consecución de esta meta son claras. Por un lado, la mejora de prestaciones se traduciría en un incremento de la tasa binaria ofrecida por las redes, que redundaría en mayores beneficios económicos para el operador, los cuales de forma indirecta se traducirían en beneficios para la sociedad: reducción de precios e impulso a la economía del sector. Por otro lado, estos beneficios supondrían un incentivo a la investigación aplicada en este campo.

Debe tenerse en cuenta además que la mejora de las redes de comunicaciones móviles puede beneficiar también a otros servicios que se apoyan en ellas (seguridad vial, asistencia sanitaria).

Los resultados esperados del proyecto encajan en las prioridades del Plan Nacional de I+D+i (§1.3.2), y están asimismo en consonancia con las líneas estratégicas prevista para el plan PRICIT de la Comunidad de Madrid (§1.3.3).

Beneficios para el grupo de investigación El proyecto se enmarca en el campo de las comunicaciones móviles de Tercera Generación y su evolución, en el cual el GTIC-Radiocomunicaciones viene desarrollando una intensa labor investigadora en los últimos años (en colaboración con la empresa Top Optimized Technologies). En el curso de esta investigación, el grupo ha mantenido contacto con algunos de los principales operadores de redes móviles y suministradores de equipos a nivel mundial, y ha participado en reuniones del grupo de trabajo RAN WG4

dentro del organismo internacional 3GPP (véase §2.2). La propuesta enmarcada en este Proyecto Investigador supone una continuidad en esta labor.

En relación con los objetivos del proyecto, los beneficios derivados para el grupo son los siguientes:

- El simulador indicado en el objetivo 1 permitirá al grupo disponer de una herramienta más completa para evaluar las prestaciones de LTE. Aunque orientada inicialmente al análisis de algoritmos de adaptación de tasa binaria y planificación de usuarios en LTE, dicha herramienta puede tener otros usos. Disponer de un simulador de enlace de LTE supone una ventaja para el grupo, de cara a la investigación relacionada con esta tecnología.
- La obtención de nuevos algoritmos para mejorar las prestaciones de LTE, de acuerdo con el objetivo 3, supondría un logro importante para el grupo de investigación, y constituiría un primer paso para la posible implantación de dichos algoritmos en redes reales y en terminales. Por otro lado, en caso de éxito, el uso de los algoritmos en redes comerciales podría representar una fuente de financiación aplicable a futuros proyectos.
- Para un grupo de investigación es fundamental dar a conocer los resultados de su trabajo y compartir ideas con grupos de otras universidades, institutos de investigación o empresas que puedan estar realizando trabajos similares. Por tanto, la labor de divulgación marcada por el objetivo 4 también constituye un beneficio en sí misma.

2.5. Plan de trabajo

2.5.1. Actividades y tareas

Las *actividades* que conforman el proyecto se establecen de acuerdo con los objetivos específicos indicados en §2.3. Cada actividad, a su vez, se subdivide en *tareas* diferenciadas. A continuación se detalla la organización.

1. *Desarrollo de un simulador de enlace para LTE*: la finalidad de esta actividad es disponer de un entorno de simulación en el que puedan probarse algoritmos de adaptación de tasa binaria y planificación de usuarios para LTE. Como se ha indicado, se partirá de un simulador de LTE existente, el cual ya ha sido adaptado por el grupo para incorporar ciertos aspectos que originalmente no estaban incluidos. El uso de dicho simulador como base facilita el desarrollo del trabajo.

Para esta actividad se establecen las dos tareas siguientes.

- 1.1 *Formación en LTE, adaptación de tasa, planificación de usuarios y simulador previo*: consiste en la formación del equipo de trabajo en la tecnología LTE, en técnicas de adaptación de tasa binaria y planificación de usuarios dependientes del canal radio, así como en el programa de simulación previamente adaptado por el grupo, que servirá como base para el simulador contemplado en este proyecto. Esta tarea incluye la identificación de qué aspectos de LTE son relevantes para el objeto del proyecto y deben ser incluidos en la simulación, y cuáles pueden abstraerse.
 - 1.2 *Desarrollo del simulador*: consiste en la programación de un simulador que incluya los aspectos relevantes identificados en la tarea 1.1, y que permita la introducción de algoritmos arbitrarios de adaptación de tasa binaria y planificación de usuarios (los cuales se definirán en la tarea 3.1). Dado que se utilizará como base un simulador ya existente, sólo será necesario programar los aspectos identificados en la tarea 1.1 que no estén incluidos en el mismo.
2. *Estudio de los algoritmos actualmente utilizados para la adaptación de tasa y planificación de usuarios en LTE*: se trata de identificar los algoritmos existentes y determinar sus prestaciones. Estas prestaciones pueden obtenerse a través de trabajos publicados por otros investigadores, o bien pueden analizarse mediante simulación y a través de medidas en redes reales.
- Dentro de esta actividad se planifican tres tareas, detalladas a continuación.
- 2.1 *Análisis de algoritmos existentes*: consiste en llevar a cabo una revisión bibliográfica para conocer los algoritmos propuestos en la literatura. Aquéllos para los que no se conozcan sus prestaciones con suficiente nivel de detalle, y que se consideren relevantes, se introducirán en el simulador para así poder evaluar su funcionamiento.
 - 2.2 *Aprendizaje de herramientas de medida*: consiste en el aprendizaje de la configuración y manejo de las herramientas de medida disponibles para LTE.
 - 2.3 *Medida y caracterización de redes actuales*: consiste en la caracterización experimental del funcionamiento de las técnicas de adaptación de tasa binaria y planificación de usuarios empleadas en redes o maquetas de LTE ya desplegadas. Se utilizarán para ello las herramientas de medida a las que se refiere la tarea 2.2. A partir de los resultados se extraerán conclusiones acerca de cuáles son los algoritmos utilizados actualmente y qué prestaciones tienen. En esta tarea se prevé la colaboración de la empresa Top Optimized Technologies.

3. *Diseño y evaluación, mediante simulación, de nuevos algoritmos de adaptación de tasa y planificación de usuarios para LTE*: esta actividad consiste en proponer nuevos algoritmos y analizar su comportamiento mediante simulación.

La actividad consta de una sola tarea, como se describe seguidamente.

- 3.1 *Diseño y evaluación de algoritmos*: el diseño de los algoritmos estará basado en los resultados de la actividad 2, y en la experiencia del grupo de investigación. Los algoritmos que se propongan deberán tener en cuenta las limitaciones que impone el estándar LTE. La evaluación se llevará a cabo introduciendo los algoritmos en el simulador de enlace desarrollado en la actividad 1. En función de los resultados, se irán proponiendo modificaciones o nuevos algoritmos con el fin de mejorar las prestaciones.

Aunque este trabajo consta de dos aspectos, que son la propuesta de algoritmos y la evaluación de sus prestaciones, ambos están estrechamente relacionados, por lo que se consideran dos partes de la misma tarea, en vez de tareas diferentes.

En esta actividad resulta fundamental la experiencia con la que cuenta el grupo de investigación, que ya ha trabajado en técnicas de adaptación al enlace radio en UMTS y HSDPA, así como, en menor medida, planificación de usuarios en LTE.

4. *Divulgación de los resultados de la investigación*: mediante esta actividad se darán a conocer los resultados del proyecto que sean más relevantes.

Se identifican dos tareas, junto con una tercera que se desarrollará o no en función de los resultados de las actividades anteriores.

- 4.1 *Participación en organismos de estandarización*: se prevé una posible participación en el grupo de trabajo RAN WG4 del 3GPP. Una finalidad de esta tarea es presentar los resultados en relación con la posible conveniencia de introducir cambios en el estándar de LTE. Un segundo propósito de esta tarea (más fácil de alcanzar que el primero) es el contacto con las numerosas empresas representadas en el 3GPP, las cuales podrían estar interesadas en los resultados que se deriven de este proyecto. Esta tarea previsiblemente se llevará a cabo en colaboración con la empresa Top Optimized Technologies.
- 4.2 *Publicación en congresos o revistas*: esta tarea consiste en la difusión de los resultados en congresos internacionales especializados, y, si los

resultados son suficientemente relevantes, en revistas con índice de impacto. Esta labor permite dar a conocer el trabajo realizado, así como establecer contacto con otros investigadores que estén trabajando en el ámbito de la optimización de LTE.

- 4.3 *Posible solicitud de patentes*: en función de los resultados, puede plantearse la solicitud de patentes relativas a los algoritmos o métodos diseñados.

2.5.2. Organización temporal

La duración planificada para el proyecto es de 18 meses. Las tareas indicadas en §2.5.1 se distribuyen en el tiempo según el diagrama mostrado en la figura 2.1. No se incluye la tarea 4.3, debido a que su realización está condicionada a los resultados que se obtengan, y no influye en el resto de tareas.

En la distribución temporal de las tareas se han tenido en cuenta las restricciones que se indican a continuación:

- La tarea 1.1 debe empezarse cuanto antes.
- La tarea 2.3 debe ser posterior a la 2.2.
- La tarea 2.1 puede beneficiarse de su ejecución en paralelo (o parcialmente en paralelo) con la 2.3.
- Es conveniente que el comienzo de la tarea 4.1 sea posterior a la tarea 2.3 y al comienzo de la 3.1.
- La tarea 4.2 sólo puede comenzarse cuando esté suficientemente avanzada la 3.1.

Se ha procurado además no situar en paralelo más de dos tareas, excepto las que se refieren a divulgación de resultados, las cuales suponen una dedicación relativamente baja.

Debe señalarse que la introducción en el simulador de algoritmos existentes (dentro de la tarea 2.1) o nuevos (dentro de la tarea 3.1) puede requerir modificaciones en el diseño del mismo (tarea 1.2). Estas modificaciones serán, no obstante, pequeñas, por lo que no se han reflejado en la organización temporal indicada en la figura 2.1.



Figura 2.1: Organización temporal de las tareas del proyecto

2.6. Medios necesarios

2.6.1. Medios materiales

Para la realización del proyecto de investigación se prevé el uso de los siguientes medios materiales.

- 2 ordenadores de sobremesa con sistema operativo Windows, software básico y conexión a Internet.
- 2 ordenadores portátiles con sistema operativo Windows.
- Bibliografía sobre el tema, incluyendo acceso a revistas y congresos del IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) e IET (*Institution of Engineering and Technology*) en formato electrónico mediante IEEE Xplore.
- Entorno de programación Matlab.
- Herramienta de medida para redes LTE Romes, de Rohde & Schwarz. La herramienta consta del programa Romes, ampliación para LTE y módem LTE compatible.

- Herramienta de medida para redes LTE E6474A, de JDSU. Consta del programa, actualización para LTE y módem LTE compatible.
- 2 tarjetas USIM (*Universal Subscriber Identity Module*) de operadores diferentes, o en su defecto tarjetas de prueba para medidas en redes piloto, utilizables durante 6 meses.
- Material fungible informático y de oficina.

Para los trabajos de simulación se utiliza Matlab. Este entorno de programación resulta muy apropiado para este tipo de proyecto, y además el grupo de investigación dispone, como se ha indicado, de simuladores en este lenguaje de programación que se utilizarán como base.

En las medidas se ha previsto el uso de dos herramientas diferentes. La motivación es, en primer lugar, el hecho de que el grupo de investigación dispone del programa básico de las dos herramientas. En el caso de la herramienta de Rohde & Schwarz, el programa ha sido cedido durante el tiempo de realización del proyecto por la Cátedra Telefónica Sostenibilidad en Comunicaciones Móviles de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Madrid. En segundo lugar, ninguna herramienta muestra la información completa relativa a la interfaz radio. Es muy posible que ciertos elementos de información sean mostrados por una herramienta y no por la otra (en trabajos de investigación anteriores se ha podido comprobar este hecho en relación con HSDPA: por ejemplo, la herramienta de JDSU muestra el CQI seleccionado con un periodo de actualización más pequeño que la de Rohde & Schwarz). Así, disponer de dos herramientas permite obtener una mayor cantidad de información sobre el funcionamiento de la interfaz radio.

Las tarjetas USIM idealmente deberían ser utilizables en redes comerciales. No obstante, la posibilidad de hacer medidas en redes ya operativas está condicionada al despliegue y lanzamiento de las mismas. En caso necesario, las medidas se realizarán en alguna de las redes piloto ya desplegadas.

2.6.2. Personal

Para el desarrollo del proyecto se requiere el siguiente personal, con la dedicación que se señala.

- Doctor Ingeniero de Telecomunicación (Director del proyecto) con 25 % de dedicación durante los 18 meses de duración del proyecto.
- Ingeniero Superior de Telecomunicación con 25 % de dedicación durante los 18 meses de duración del proyecto.

- 2 becarios de Proyecto Fin de Carrera con dedicación de 30 horas semanales. El periodo de permanencia puede ser flexible, entre 15 y 18 meses desde el principio del proyecto.
- Técnico de apoyo con 25 % de dedicación durante los 18 meses de duración del proyecto.

2.7. Presupuesto y financiación

2.7.1. Presupuesto

De los medios materiales descritos en §2.6.1, el grupo de investigación cuenta actualmente con los siguientes:

- Ordenadores de sobremesa y portátiles, con software necesario y conexión a Internet.
- Bibliografía básica.
- Programa básico de medida Romes con licencia de uso. No se dispone de la ampliación para LTE ni del módem LTE compatible.

Además, los siguientes servicios son proporcionados por la Universidad Politécnica de Madrid:

- Acceso completo a IEEEExplore.
- Licencias de uso de Matlab.

De acuerdo con esto, se presentan dos versiones del presupuesto: presupuesto real, contando con la disponibilidad previa de los equipos indicados; y presupuesto completo, incluyendo el coste que tendrían dichos equipos (no se considera el coste de los servicios proporcionados por la Universidad Politécnica de Madrid). Las tablas 2.1 y 2.2 muestran, respectivamente, las dos modalidades. Para su elaboración se ha tenido en cuenta lo siguiente:

- Los salarios mensuales del personal, teniendo en cuenta su dedicación, son 1500 € para el Doctor Ingeniero, 1000 € para el ingeniero, 900 € para cada becario y 500 € para el técnico de apoyo.
- El coste de inscripción en un congreso internacional se cifra en 1000 €. Se contempla la participación en 2 congresos.

- El coste de publicación de un artículo en revista internacional se calcula en 1000 €. ⁹ Se considera la publicación de 1 artículo.
- El gasto de un viaje a un congreso internacional o reunión de organismo de estandarización, incluyendo desplazamiento y dietas, se estima en 1500 € por persona. Se prevé la realización de 2 viajes de 1 persona (congresos) y 2 viajes de 2 personas (organismo de estandarización).
- El uso de las redes LTE comerciales, en su caso, se calcula en 50 € mensuales para cada tarjeta USIM.

2.7.2. Financiación

La financiación se puede plantear por medio de varias vías:

- Convocatorias públicas de ayuda a proyectos de investigación nacionales, de la Comunidad de Madrid o gestionados por la Universidad Politécnica de Madrid.
- Ayudas específicas para publicación de artículos en revistas y congresos de la Universidad Politécnica de Madrid, o de su Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación.
- Financiación a través de empresas.

De las convocatorias públicas, una primera opción que puede utilizarse viene dada por el Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica (I+D+i), y más concretamente el plan Avanza (§1.3.2). De acuerdo con la convocatoria más reciente (2010), los conceptos susceptibles de ayuda en el subprograma Avanza Competitividad son [66]:

- Gastos de personal (investigadores, técnicos y demás personal auxiliar, exclusivamente en la medida en que esté dedicado al proyecto).
- Inversiones materiales o inmateriales de productos dedicados al proyecto o acción.
- Subcontrataciones y gastos de servicios de tecnología de la información y las comunicaciones dedicados al proyecto o acción durante su plazo de ejecución.

⁹Esta cantidad corresponde aproximadamente a un artículo de 10 páginas en *IEEE Transactions on Communications*, a razón de 110 \$ cada página de las 7 primeras y 210 \$ cada página que exceda de 7; con un cambio aproximado 1\$ = 0,72 €.

Tabla 2.1: Presupuesto real (sin incluir el coste de los equipos ya disponibles)

Material inventariable	
Bibliografía especializada	400 €
Ampliación de software Romes para LTE	10000 €
Módem o tarjeta de conexión compatible con Romes	1000 €
Ampliación de software E6474A para LTE	8000 €
Módem o tarjeta de conexión compatible con E6474A	1000 €
Gastos de personal	
Doctor Ingeniero de Telecomunicación (25 %, 18 meses)	27000 €
Ingeniero Superior de Telecomunicación (25 %, 18 meses)	18000 €
2 becarios (30 horas semanales, 18 meses)	32400 €
Técnico de apoyo (25 %, 18 meses)	9000 €
Gastos de publicaciones y viajes	
Inscripción en 2 congresos internacionales	2000 €
Publicación de 1 artículo en revista internacional	1000 €
Viajes (congresos, organismo de estandarización)	9000 €
Otros gastos	
Dos tarjetas USIM para uso de LTE durante 6 meses	600 €
Material fungible informático y de oficina	1000 €
Coste real	120400 €

Tabla 2.2: Presupuesto completo (incluyendo el coste de todos los equipos)

Del presupuesto anterior (tabla 2.1)	
Coste real	120400 €
Material inventariable	
Bibliografía básica	400 €
2 ordenadores de sobremesa	2500 €
2 ordenadores portátiles	2000 €
Software básico Romes con licencia de uso	22000 €
Software básico E6474A con licencia de uso	24000 €
Coste completo	171300 €

- Gastos generales suplementarios directamente derivados del proyecto (costes indirectos, obtención de patentes y otras formas de protección de la propiedad intelectual, viajes).
- Otros gastos de funcionamiento, incluidos costes de material, suministros y productos similares que se deriven directamente de la actividad del proyecto.

Teniendo en cuenta que en el proyecto participan de manera conjunta el GTIC-Radiocomunicaciones de la Universidad Politécnica de Madrid y la empresa Top Optimized Technologies, pueden plantearse dos modalidades de participación: en cooperación entre ambas entidades, o bien la Universidad Politécnica de Madrid puede participar como subcontratada por la empresa, que sería la solicitante de la ayuda. En los últimos años, dentro de la colaboración que han mantenido el GTIC-Radiocomunicaciones y Top Optimized Technologies, se han solicitado y han sido concedidas ayudas para diversos proyectos utilizando las dos modalidades.

Tradicionalmente la Universidad Politécnica de Madrid ha mantenido una política de ayudas económicas para la publicación de resultados de investigación (§1.3.4) [67]. En los últimos años la cuantía límite ha sido de 800 € por beneficiario y año para artículos en revistas, y de 1200 € para la presentación de ponencias y comunicaciones en congresos, aplicables a gastos de desplazamiento, dietas e inscripción al congreso. Desde el año 2010, debido a restricciones presupuestarias, la convocatoria está cerrada. Es de esperar, no obstante, que en un futuro vuelva

a abrirse. Por su parte, la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación ha mantenido en 2010 una convocatoria para publicación de artículos en revista (§1.3.5) [68], con características similares a la convocatoria general de la Universidad. La oferta de la Escuela previsiblemente volverá a abrirse dentro del año 2011 (si no lo hace la de la Universidad). Este tipo de ayudas podrían aplicarse para financiar parte del gasto de publicaciones previstas en este proyecto.

En cuanto a financiación privada, la colaboración de la empresa Top Optimized Technologies en el proyecto permite asegurar un apoyo en este sentido. Se prevé que, en lo que respecta a personal (véase §2.6.2), el ingeniero sea un trabajador de dicha empresa, financiado por ésta. Asimismo, la empresa puede completar la financiación de las becas en caso de que la ayuda pública conseguida no cubra todos los gastos.

Para la solicitud de patentes, en caso de tener lugar, la financiación sería asumida por la empresa Top Optimized Technologies, que se beneficiaría de su posible explotación.

2.8. Difusión de resultados

Una de las actividades previstas en el plan de trabajo (§2.5.1) es la difusión de los resultados de la investigación (actividad 4), en forma de publicaciones en congresos internacionales y, en su caso, revistas internacionales.

Entre los congresos en los que pueden publicarse resultados del trabajo se destacan los siguientes, centrados en las comunicaciones móviles:

- *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications* (PIMRC), anual;
- *IEEE Vehicular Technology Conference* (VTC), semestral;
- *IEEE Wireless Communications and Networking Conference* (WCNC), anual.

Otros congresos, más generales, en los que también puede plantearse la publicación de los resultados son:

- *IEEE International Conference on Communications* (ICC), anual;
- *IEEE Global Communications Conference* (GLOBECOM), anual.

Para dar a conocer los resultados en el ámbito empresarial puede considerarse también, a nivel nacional, el siguiente congreso, si bien debe tenerse en cuenta que está menos orientado a actividades de investigación:

- *Jornadas Telecom I+D*, anual.

Algunas revistas con índice de impacto JCR (*Journal Citation Reports*) a las que, por su temática, se pueden ajustar los resultados del proyecto son:

- *IEEE Transactions on Wireless Communications*;
- *IEEE Transactions on Communications*;
- *IEEE Transactions on Vehicular Technology*;
- *IEEE Communications Letters*.

Referencias

- [1] Resolución de 30 de diciembre de 2010, de la Universidad Politécnica de Madrid, por la que se convoca concurso de acceso a plazas de cuerpos docentes universitarios. Boletín Oficial del Estado, 18 de enero de 2011.
- [2] Real Academia Española. *Diccionario de la Lengua Española*. Vigésima segunda edición. <http://buscon.rae.es/draeI>.
- [3] Ley Orgánica 6/2001, de 21 de diciembre, de Universidades. Boletín Oficial del Estado, 24 de diciembre de 2001.
- [4] Ley Orgánica 4/2007, de 12 de abril, por la que se modifica la Ley Orgánica 6/2001, de 21 de diciembre, de Universidades. Boletín Oficial del Estado, 13 de abril de 2007.
- [5] Decreto 74/2010, de 15 de noviembre, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueban los Estatutos de la Universidad Politécnica de Madrid. Boletín Oficial de la Comunidad de Madrid, 15 de noviembre de 2003.
- [6] FP7 fact sheets. Comisión Europea, 2007. ec.europa.eu/research/fp7/understanding/index.html.
- [7] Real decreto 887/2006, de 21 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de la Ley 38/2003, de 17 de noviembre, General de Subvenciones. Boletín Oficial del Estado, 25 de julio de 2006.
- [8] Ley 28/2006, de 18 de julio, de Agencias estatales para la mejora de los servicios públicos. Boletín Oficial del Estado, 19 de julio de 2006.
- [9] Plan de Ciencia y Tecnología de la Comunidad de Madrid. IV PRICIT. Consejería de Educación. Comunidad de Madrid. <http://www.madrimasd.org/queesmadrimasd/pricit/>.
- [10] Luis Mendo. *Capacidad en Sistemas Celulares W-CDMA*. Tesis Doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, Diciembre 2001.

REFERENCIAS

- [11] Luis Mendo y José María Hernando. On dimension reduction for the power control problem. *IEEE Transactions on Communications*, 49(2):243–248, Febrero 2001.
- [12] Luis Mendo y José María Hernando. An efficient algorithm for determination of the optimum base-station assignment in cellular DS-CDMA systems. *IEEE Transactions on Communications*, 52(3):435–445, Marzo 2004.
- [13] Luis Mendo y José María Hernando. A simple sequential stopping rule for Monte Carlo simulation. *IEEE Transactions on Communications*, 54(2):231–241, Febrero 2006.
- [14] Luis Mendo y José María Hernando. Improved sequential stopping rule for Monte Carlo simulation. *IEEE Transactions on Communications*, 56(11):1761–1764, Noviembre 2008.
- [15] Luis Mendo. Estimation of a probability with guaranteed normalized mean absolute error. *IEEE Communications Letters*, 13(11):817–819, Noviembre 2009.
- [16] Luis Mendo y José María Hernando. Estimation of a probability with optimum guaranteed confidence in inverse binomial sampling. *Bernoulli*, 16(2):493–513, Mayo 2010.
- [17] Luis Mendo y José María Hernando. Uplink and downlink traffic capacity performance in WCDMA systems. En *Wireless Design Conference*, volume 1, págs. 117–120, Mayo 2002. Véase también *Wireless Europe*, Septiembre 2002, p. 14.
- [18] Luis Mendo. A suboptimum base-station assignment for CDMA cellular networks with closed-loop power control. En *Proceedings of the IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications*. IEEE, Septiembre 2004.
- [19] Luis Mendo y José María Hernando. Improved algorithm for computation of transmission powers in DS-CDMA cellular networks with closed-loop power control. En *IEEE Vehicular Technology Conference Fall*. IEEE, Septiembre 2008.
- [20] Luis Mendo y José María Hernando. Unbiased Monte Carlo estimator with guaranteed confidence. En *IEEE International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications*, págs. 625–628. IEEE, 2008.

- [21] Alfonso Campo, Miguel Blanco, Luis Mendo, José María Hernando y Álvaro López. Power control method by external loop used in mobile communication system; involves determining sum of two components, determined using objective block error rate, to establish desired interference signal relation. Patente ES2249192, Top Optimized Technologies, 2006. <http://http://v3.espacenet.com/textdoc?DB=EPDOC&IDX=ES2249192&F=0>.
- [22] Alfonso Campo, Miguel Blanco, Luis Mendo, José María Hernando y Álvaro López. External loop power control method for wireless communication systems; involves modifying target interference signal when unwinding is detected to accommodate power control of external loop. Patente ES2250009, Top Optimized Technologies, 2006. <http://http://v3.espacenet.com/textdoc?DB=EPDOC&IDX=ES2250009&F=0>.
- [23] Álvaro López, Alfonso Campo, José María Hernando y Luis Mendo. Método y aparato de control de potencia por lazo externo para sistemas de comunicación inalámbrica; permite ajustar rápidamente la relación señal deseada-interferencia objetivo al inicio de cada transmisión. Patente ES2255887, Top Optimized Technologies, 2006. http://v3.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument?FT=D&date=20060701&DB=EPDOC&locale=en_EP&CC=ES&NR=2255887A1&KC=A1.
- [24] Álvaro López, José María Hernando, Luis Mendo, Miguel Blanco, Manuel Cruz y Alfonso Campo. Method and apparatus for receive diversity control in wireless communications systems. Patente ES2250009, Top Optimized Technologies, 2008. http://v3.espacenet.com/publicationDetails/biblio?CC=W0&NR=2008095973A1&KC=A1&FT=D&date=20080814&DB=EPDOC&locale=en_EP.
- [25] Álvaro López, José María Hernando, Luis Mendo, Miguel Blanco, Manuel Cruz y Alfonso Campo. Method and apparatus for detecting a minimum transmission power state in a closed loop power controlled channel of wireless communications systems. Patente WO2008095958, Top Optimized Technologies, 2008. http://v3.espacenet.com/publicationDetails/biblio?DB=EPDOC&adjacent=true&locale=en_EP&FT=D&date=20080814&CC=W0&NR=2008095958A1&KC=A1.
- [26] Test cases for the convergence speed of the outer loop power control for low BLER target services. Technical Report TSG R4-040613, Third Generation Partnership Project, Noviembre 2004. http://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/WG4_Radio/TSGR4_33/Docs/R4-040613.zip.

REFERENCIAS

- [27] New test for downlink outer loop power control convergence speed. Technical Report TSG R4-050055, Third Generation Partnership Project, Febrero 2005. http://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/WG4_Radio/TSGR4_34/Docs/R4-050055.zip.
- [28] Outer loop power control (OLPC) system level simulation. Technical Report TSG R4-050329, Third Generation Partnership Project, Mayo 2005. http://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/WG4_Radio/TSGR4_35/Docs/R4-050329.zip.
- [29] Study or work item proposal for outer loop power control (OLPC) convergence speed (downlink system level simulations). Technical Report TSG R4-051038, Third Generation Partnership Project, Agosto 2005. http://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/WG4_Radio/TSGR4_36/Docs/R4-051038.zip.
- [30] José María Hernando. *Comunicaciones Móviles*. CEURA, segunda edición, 2004.
- [31] José María Hernando y Cayetano Lluch, editores. *Comunicaciones Móviles de Tercera Generación UMTS*. Telefónica Móviles España, segunda edición, 2001.
- [32] Erik Dahlman, Stefan Parkvall, Johan Sköld y Per Beming. *3G Evolution. HSPA and LTE for Mobile Broadband*. Academic Press, segunda edición, 2008.
- [33] Stefania Sesia, Issam Toufik y Matthew Baker, editores. *LTE. The UMTS Long Term Evolution*. John Wiley and Sons, 2009.
- [34] Ramón Agustí, editor. *LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles*. Funcación Vodafone España, 2010.
- [35] David Tse y Pramod Viswanath. *Fundamentals of Wireless Communication*. Cambridge University Press, 2005.
- [36] Siavash M. Alamouti. A simple transmit diversity technique for wireless communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 16(8):1451–1458, Octubre 1998.
- [37] Juho Lee, Jin-Kyu Han y Jianzhong Zhang. MIMO technologies in 3GPP LTE and LTE-Advanced. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2009, 2009.

- [38] Ch. Wengerter, A. Golitschek Edler von Elbwart, E. Seidel, G. Velev y M. P. Schmitt. Advanced hybrid ARQ technique employing a signal constellation rearrangement. En *IEEE Vehicular Technology Conference Fall*, págs. 2002–2006. IEEE, 2002.
- [39] Kian Chung Beh, Angela Doufexi y Simon Armour. Performance evaluation of hybrid ARQ schemes of 3GPP LTE OFDMA system. En *Proceedings of the IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications*, págs. 1–5. IEEE, 2007.
- [40] Kingsley Oteng-Amoako, Jinhong Yuan y Saeid Nooshabadi. Selective hybrid-ARQ turbo schemes with various combining methods in fading channels. En *Proceedings of the Workshop on Modelling and Optimisation in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks*. IEEE, 2003.
- [41] Andrew J. Viterbi. Wireless digital communication: A view based on three lessons learned. *IEEE Communications Magazine*, págs. 33–36, Septiembre 1991.
- [42] Farooq Khan, editor. *LTE for 4G Mobile Broadband*. Cambridge University Press, 2009.
- [43] John G. Proakis. *Digital Communications*. McGraw-Hill, cuarta edición, 2001.
- [44] Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); physical layer procedures. Technical Specification 3G TS 36.213 v8.8.0, Third Generation Partnership Project, Diciembre 2009.
- [45] Klaus I. Pedersen, Guillaume Monghal, István Z. Kovács, Troels D. Kolding, Akhilesh Pokhariyal, Frank Frederiksen y Preben Mogensen. Frequency domain scheduling for ofdma with limited and noisy channel feedback. En *IEEE Vehicular Technology Conference Fall*, págs. 1792–1796. IEEE, 2007.
- [46] István Z. Kovács, Klaus I. Pedersen, Troels E. Kolding, Akhilesh Pokhariyal y Markku Kuusela. Effects of non-ideal channel feedback on dual-stream MIMO-OFDMA system performance. En *IEEE Vehicular Technology Conference Fall*. IEEE, 2007.
- [47] A. Pokhariyal, K. I. Pedersen, G. Monghal, I. Z. Kovacs, C. Rosa, T. E. Kolding y P. E. Mogensen. HARQ aware frequency domain packet scheduler with different degrees of fairness for the UTRAN long term evolution. En *IEEE Vehicular Technology Conference Spring*, págs. 2761–2765. IEEE, 2007.

REFERENCIAS

- [48] A. Duel-Hallen, S. Hu y H. Hallen. Long-range prediction of fading signals. *IEEE Signal Processing Magazine*, págs. 62–75, Mayo 2002.
- [49] A. Pokhariyal, G. Monghal, K. I. Pedersen, P. E. Mogensen, I. Z. Kovacs, C. Rosa y T. E. Kolding. Frequency domain packet scheduling under fractional load for the UTRAN LTE downlink. En *IEEE Vehicular Technology Conference Spring*, págs. 699–703. IEEE, 2007.
- [50] Preben Mogensen, Wei Na, István Z. Kovács, Frank Frederiksen, Akhilesh Pokhariyal, Klaus I. Pedersen, Troels Kolding, Klaus Hugl y Markku Kuusela. LTE capacity compared to the Shannon bound. En *IEEE Vehicular Technology Conference Spring*. IEEE, 2007.
- [51] Christian Wengerter, Jan Ohlhorst y Alexander Golitschek Edler von Elbwart. Fairness and throughput analysis for generalized proportional fair frequency scheduling in OFDMA. En *IEEE Vehicular Technology Conference Spring*. IEEE, 2005.
- [52] Narciso García Cano. Técnicas de adaptación al enlace radio en LTE. Proyecto Fin de Carrera, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid. En preparación.
- [53] Arne Simonsson. Frequency reuse and intercell interference co-ordination in E-UTRA. En *IEEE Vehicular Technology Conference Spring*. IEEE, 2007.
- [54] Na Wei, Troels B. Sørensen, Troels E. Kolding y Preben E. Mogensen. Analysis and evaluation of link adaptation including MIMO adaptation. En *IEEE Vehicular Technology Conference Fall*. IEEE, 2006.
- [55] István Z. Kovács, Markku Kuusela, Elena Vîrtej y Klaus I. Pedersen. Performance of MIMO aware RRM in downlink OFDMA. En *IEEE Vehicular Technology Conference Spring*. IEEE, 2008.
- [56] Suk-Bok Lee, Sayantan Choudhury, Ahmad Khoshnevis, Shugong Xu y Songwu Lu. Downlink MIMO with frequency-domain packet scheduling for 3GPP LTE. En *IEEE International Conference on Computer Communications*. IEEE, 2009.
- [57] Na Wei, Akhilesh Pokhariyal, Troels B. Sørensen, Troels E. Kolding y Preben E. Mogensen. Performance of MIMO with frequency domain packet scheduling in UTRAN LTE downlink. En *IEEE Vehicular Technology Conference Spring*. IEEE, 2007.

- [58] Tero Ojanperä y Ramjee Prasad. *Wideband CDMA for Third Generation Mobile Communications*. Artech House, 1998.
- [59] Seppo Hämmäläinen, Peter Slanina, Magnus Hartman, Antti Lappeteläinen, Harri Holma y Oscar Salonaho. A novel interface between link and system level simulations. En *ACTS Summit*, págs. 599–604, 1997.
- [60] Yufei W. Blankenship, Philippe J. Sartori, Brian K. Classon, Vip Desai y Kevin L. Baum. Link error prediction methods for multicarrier systems. En *IEEE Vehicular Technology Conference Fall*. IEEE, Septiembre 2004.
- [61] Karsten Brueninghaus, David Astély, Thomas Sälzer y Samuli Visuri. Link performance models for system level simulations of broadband radio access systems. En *Proceedings of the IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications*. IEEE, 2005.
- [62] Christian Mehlführer, Martin Wrulich, Josep Colom Ikuno, Dagmar Bosanska y Markus Rupp. Simulating the Long Term Evolution physical layer. En *European Signal Processing Conference*, 2009.
- [63] Josep Colom Ikuno, Martin Wrulich y Markus Rupp. System level simulation of LTE networks. En *IEEE Vehicular Technology Conference Spring*. IEEE, 2010.
- [64] Jan Ellenbeck, Johannes Schmidt, Ulrike Korger y Christian Hartmann. A concept for efficient system-level simulations of OFDMA systems with proportional fair fast scheduling. En *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*. IEEE, 2009.
- [65] Physical layer aspects for evolved universal terrestrial radio access (UTRA). Technical Report 3G TR 25.814 v7.1.0, Third Generation Partnership Project, Septiembre 2006.
- [66] Orden ITC/712/2010, de 16 de marzo, por la que se regulan las bases, el régimen de ayudas y la gestión del plan avanza, en el marco de la acción estratégica de telecomunicaciones y sociedad de la información, dentro del plan nacional de investigación científica, desarrollo e innovación tecnológica, 2008-2011. Boletín Oficial del Estado, 23 de marzo de 2011.
- [67] Ayudas y convocatorias para la difusión y explotación de resultados. Universidad Politécnica de Madrid, 2010. <http://www.upm.es/institucional/Investigadores/AyudasConvocatorias/DifusionExplotacionResultados>.

REFERENCIAS

- [68] Normas y procedimiento para la concesión de ayudas para la publicación de artículos en revistas. ejercicio 2010. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación. Universidad Politécnica de Madrid, 2010. <http://www.etsit.upm.es/investigacion/investigacion-en-la-etsit/ayudas-economicas.html>.

Glosario de siglas

Se recogen a continuación las siglas utilizadas en el Proyecto Investigador, junto con su significado.

3GPP	<i>Third Generation Partnership Project</i>
3GPP2	<i>Third Generation Partnership Project 2</i>
BLER	<i>Block Error Rate</i>
CAIT	<i>CDMA Air Interface Tester (Qualcomm)</i>
CENIT	<i>Consortios Estratégicos Nacionales en Investigación Técnica</i>
COST	<i>European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research</i>
CQI	<i>Channel Quality Indicator</i>
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
EESM	<i>Exponential Effective SINR Mapping</i>
EPC	<i>Evolved Packet Core</i>
ETSI	<i>European Telecommunication Standards Institute</i>
E-UTRA	<i>Evolved UMTS Terrestrial Radio Access</i>
FDD	<i>Frequency-Division Duplex</i>
FDPF	<i>Frequency-Domain Proportional Fair</i>
FSTD	<i>Frequency-Shift Transmit Diversity</i>
GLOBECOM	<i>Global Telecommunications Conference</i>
GRC	<i>Grupo de Radiocomunicación</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
GTIC	<i>Grupo de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones</i>
HARQ	<i>Hybrid Automatic Retransmission Query</i>
HSDPA	<i>High Speed Downlink Packet Access</i>
HSUPA	<i>High Speed Uplink Packet Access</i>
ICC	<i>International Conference on Communications</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IET	<i>Institution of Engineering and Technology</i>
ILLA	<i>Inner-Loop Link Adaptation</i>
JCR	<i>Journal Citation Reports</i>
JDSU	<i>Jones, Duck and Straus/Sinclair Uniphase</i>

GLOSARIO DE SIGLAS

LTE	<i>Long-Term Evolution</i>
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
MU-MIMO	<i>Multiuser MIMO</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiplexing</i>
OLLA	<i>Outer-Loop Link Adaptation</i>
PF	<i>Proportional Fair</i>
PIMRC	<i>International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Communications</i>
PMI	<i>Precoding Matrix Index</i>
PRICIT	<i>Plan Regional de Investigación Científica e Innovación Tecnológica</i>
PROFIT	<i>Programa de Fomento de la Investigación Técnica</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QPSK	<i>Quaternary Phase Shift Keying</i>
RAN WG4	<i>Radio Access Network Working Group 4 (3GPP)</i>
RB	<i>Resource Block</i>
RI	<i>Rank Indication</i>
SAE	<i>Service Architecture Evolution</i>
SC-FDMA	<i>Single-Carrier Frequency-Division Multiple Access</i>
SFBC	<i>Space-Frequency Block Coding</i>
SINR	<i>Signal to Interference plus Noise Ratio</i>
SU-MIMO	<i>Single-User MIMO</i>
TDD	<i>Time-Division Duplex</i>
TEMS	<i>Test Mobile System (Ericsson)</i>
UE	<i>User Equipment</i>
UMB	<i>Ultra Mobile Broadband</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
USIM	<i>Universal Subscriber Identity Module</i>
UTRA	<i>UMTS Terrestrial Radio Access</i>
V-BLAST	<i>Vertical Bell Laboratories Layered Space-Time</i>
VTC	<i>Vehicular Technology Conference</i>
WCDMA	<i>Wideband Code-Division Multiple Access</i>
WCNC	<i>Wireless Communications and Networking Conference</i>
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>
XCAL-W	<i>Extensive CDMA Advanced Logger for Wide Band (Couei)</i>